



Pro gradu -tutkielma

Maantiede

Luonnonmaantiede

ARKTIS-ALPIINISEN ALUEEN HIILIDIOKSIDIVUON MITTAAMINEN JA  
MALLINTAMINEN MAISEMAMITTAKAAVASSA

Markus Jylhä

2017

Ohjaajat:  
Miska Luoto  
Janne Rinne

HELSINGIN YLIOPISTO  
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA  
GEOTIETEIDEN JA MAANTIETEEN LAITOS  
MAANTIEDE

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)  
00014 Helsingin yliopisto

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty<br>Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta   |   | Laitos/Institution– Department<br>Geotieteiden ja maantieteen laitos |  |
| Tekijä/Författare – Author<br><br>Markus Jylhä   |   |  |  |
| Työn nimi / Arbetets titel – Title<br><br>Arktis-alpiinisen alueen hiilidioksidivuon mittaaminen ja mallintaminen maisemamittakaavassa   |   |  |  |
| Oppiaine /Läroämne – Subject<br>Maantiede  |   |  |  |
| Työn laji/Arbetets art – Level<br>Pro Gradu  | Aika/Datum – Month and year<br>Lokakuu 2017 | Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages<br>80                         |  |
| Tiivistelmä/Referat – Abstract<br><br><p>Hiilidioksidivuon alueellista jakautumista maisemamittakaavassa on tutkittu melko vähän. Suurin osa aiemmasta hiilidioksidivuotutkimuksesta on keskittynyt temporaalisten vaihteluiden selvittämiseen tai suuremman mittakaavan alueelliseen vaihteluun. Arktis-alpiiniselle alueelle on tyypillistä, että kasvillisuuden määrä vaihtelee voimakkaastikin hyvin pienellä alueella. Sen takia ilmiötä lähdettiin tutkimaan myös maisemamittakaavassa. Etenkin pensaikon odotetaan lisääntyvän tundralla lämpötilojen noustessa, joten hiilidioksidivuonkin voi tundralla odottaa muuttuvan tulevaisuudessa. On mahdollista, että tundra muuttuu vähitellen hiilidioksidin nielusta hiilidioksidin lähteeksi. Kasvillisuuden määrän ja lämpötilojen voi odottaa vaikuttavan hiilidioksidivuohon, mutta muutkin ympäristömuuttujat voivat olla merkittäviä tekijöitä.</p> <p>Kammiomittauksessa hiilidioksidivuon voimakkuutta tutkitaan asettamalla maahan valoa läpäisevä kammio, jonka sisältä mitataan hiilidioksidipitoisuutta säännöllisin väliajoin. Mittauksia tehdään kirkkaassa valossa, himmennetyssä valossa ja pimeässä. Näitä tuloksia käsittelemällä saadaan määriteltyä kohteen tuotanto ja respiraatio. Tutkimusalueen koko on n. 50 km<sup>2</sup> ja se sijaitsee pohjoisessa Norjassa n. 40 kilometrin päässä Jäämeren rannalta Rastigaissa-tunturin ympäristössä. Koealojen korkeus vaihtelee välillä 121m m.p.y ja 1004m m.p.y. Alueen vuotuinen keskilämpötila on -2,5°C. Alueella on ollut melko vähän ihmistoimintaa. Suuri korkeusgradientti tarjoaa monipuoliset ympäristömuuttujat kohtuullisen kokoisella tutkimusalueella. Hiilidioksidivuoaainestoa on 27 koealalta, yhteensä 57 mittauskautukselta.</p> <p>Tuotannon ja respiraation jakautumista alueella tutkittiin GAM (generalized additive model) -mallien avulla. Koealakohdista tietoa selitettiin kaukokartoitusmuuttujilla ja kauluskohtaista tietoa paikan päältä mitatuilla ympäristömuuttujilla. Kaukokartoitusaineiston perusteella tärkein hiilidioksidivuota selittävä tekijä on NDVI (normalized different vegetation index). Kauluskohtaisella aineistolla tärkein ympäristötekijä on keskilämpötila. Keskilämpötila on myös oleellinen NDVI:n selittäjä, joten lämpötilan vaikutusta voi pitää varsin merkittävänä. Tärkeimmän selittävän muuttujan osalta vaikutus oli samanlainen sekä fotosynteesille että respiraatiolle.</p> <p>Kammiomittausta kehitettiin tässä tutkimuksessa uutena menetelmänä Helsingin yliopiston Geotieteiden ja maantieteen laitoksella. Merkittävässä osassa tutkimusta oli menetelmän käyttökelpoisuuden ja luotettavuuden arviointi. Kammio menetelmä on kohtuullisin ponnistuksin käytettävissä erämaisissa olosuhteissa, vaikkakin mittaamiseen kuluu melko paljon aikaa. Mikäli verkkosähköä ei ole tutkimusalueella käytettävissä, on laitteistoa mahdollista ladata aurinkopaneeliin perustuvalla järjestelmällä. Useista epäluotettavuuslähteistä johtuen mittauskampanjaa ei kuitenkaan voi pitää pelkästään mekaanisena suorittamisena, vaan on jatkuvasti kiinnitettävä huomiosta useisiin yksityiskohtiin. Virheitä voivat aiheuttaa esimerkiksi vääränlainen kauluksen asennus maahan, varmaton kammion asetus kaulukselle, liikkuminen koealalla mittauksen aikana, liian lyhyt kammion tuuletusaika mittauksen jälkeen ja olosuhteiden muutokset. Ottamalla kaikki virhelähteet huomioon on kuitenkin mahdollista kerätä aineistoa melko hankalassakin maastossa.</p> |   |  |  |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords<br><br>Hiilidioksidivuoto, fotosynteesi, respiraatio, tundra, arktis-alpiininen, GAM, kammio menetelmä   |   |  |  |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited<br>HELDA  |   |  |  |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information  |   |  |  |

|  |   |   |  |
|--|---|---|--|
| Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty<br>Faculty of science   |   | Laitos/Institution– Department<br>Department of Geosciences and Geography |  |
| Tekijä/Författare – Author<br>Markus Jylhä   |   |   |  |
| Työn nimi / Arbetets titel – Title<br>Measuring and Modeling Carbon Dioxide Flux of Arctic Alpine Environment in Landscape Scale   |   |   |  |
| Oppiaine /Läroämne – Subject<br>Geography  |   |   |  |
| Työn laji/Arbetets art – Level<br>Master's thesis  | Aika/Datum – Month and year<br>October 2017 | Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages<br>80                              |  |
| <p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>The spatial distribution of carbon dioxide fluxes in landscape scale is not much studied subject. Most of the previous studies have been concentrated on temporal variations of the flux. As strong spatial variation of vegetation in local scale is typical for tundra, it was important to study the CO<sub>2</sub> fluxes in landscape scale. Especially the shrubs are expected to grow in abundance when the temperatures are rising, and one can expect that the CO<sub>2</sub> flow is going to change as well. It is possible, that the tundra is shifting from a carbon sink into a carbon source. The amount of vegetation and the temperatures are most likely the limiting factors of CO<sub>2</sub> flux, but several other environmental factors can also be significant.</p> <p>A portable chamber fitted with a CO<sub>2</sub> sensor can be used to measure the carbon dioxide flow. The chamber is put on a plastic collar which is fitted to the ground. The CO<sub>2</sub> concentration is measured between certain time steps and the flux is calculated using linear regression between concentration and time. Several different measurements under different lighting conditions are required to determine GPP (gross primary productivity) and ER (ecosystem respiration). The study area is located in northern Norway, approx. 40 km from the polar sea shore, around the Rastigaissa massif. The height of the study sites varies from 121 m a.s.l. to 1004 m a.s.l., and the mean annual temperature is -2.5°C. There has been very little human activity in the research area. The substantial gradient in height offers a diverse variety of environmental factors within a reasonable extent of the study area.</p> <p>The spatial distribution of GPP and ER was studied using GAM (generalized additive models) -modelling. The study site level data was explained with remotely sensed information and the collar level data was explained with the information from the in situ measurements. According to the remotely sensed data, the most important factor to explain both GPP and ER was NDVI (normalized different vegetation index). According to the in situ measurements, the mean air temperature was most important factor to explain both GPP and ER. As temperature is also partly determining NDVI, it can be considered as a very important factor for both GPP and ER.</p> <p>The chamber measurement was used for the first time in the Department of Geosciences and Geography as a new method. The evaluation of the usability and reliability of the method was a significant part of this study. The chamber method can be used with moderate effort in the wilderness, although the measurement process take fairly much time. If there is no power network available in the study area, it is possible to charge the equipment with a system based on a solar panel. Due to several possible sources of error, the measuring campaign cannot be considered merely as a mechanical task. Every possible reliability related detail has to be considered every time a measurement is done. Reliability problems can be caused for example by a bad installation of the collar to the ground, too fast fitting of the chamber to the collar, walking with heavy footsteps within the study site during measuring, too short ventilation time between measurements and changes in the environmental conditions. It is, however, possible to collect data even in a fairly difficult terrain by taking all the sources of errors into consideration.</p> |   |   |  |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords<br>carbon dioxide flux, photosynthesis, respiration, tundra, arctic-alpine, GAM, chamber method  |   |   |  |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited<br>HELDA  |   |   |  |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information  |   |   |  |

# Sisällysluettelo

|   |    |
|---|----|
| Johdanto.....                                   | 7  |
| Tutkimuskysymykset.....                         | 8  |
| Teoreettinen tausta .....                       | 9  |
| Fotosynteesi .....                              | 9  |
| Fotosynteettisesti aktiivinen PAR-säteily ..... | 9  |
| Respiraatio .....                               | 10 |
| Fotorespiraatio.....                            | 10 |
| Hiilidioksidivuo ja prosessit.....              | 11 |
| Aiempi tutkimus .....                           | 13 |
| Tutkimusalue.....                               | 15 |
| Koealat.....                                    | 17 |
| Menetelmät .....                                | 18 |
| Mittausmenetelmä .....                          | 18 |
| Mittausvälineistö .....                         | 20 |
| Kammio.....                                     | 20 |
| Kammion kaulukset.....                          | 21 |
| Vallitsevan valaistuksen himmentäminen.....     | 22 |
| Anturit ja datankeruulaite.....                 | 22 |
| Aineiston käsittely kentällä .....              | 24 |
| Laitteiden akkujen lataaminen.....              | 25 |
| Ilmanpaineen mittaaminen .....                  | 26 |
| PAR-säteilyn mittaaminen .....                  | 27 |
| Aineisto.....                                   | 27 |
| Ympäristömuuttujat .....                        | 28 |
| Kaukokartoitusaineisto .....                    | 29 |



|  |    |
|--|----|
| Aineiston analysointi.....   | 30 |
| Aineiston esikäsittely.....  | 30 |
| Pitoisuuksien muuttaminen vuoarvoiksi.....                                       | 31 |
| Vuoarvojen karsiminen.....   | 32 |
| GPP-arvon ja respiraation laskeminen.....  | 32 |
| Valovastekäyrien sovittaminen .....  | 34 |
| GPP-arvojen ennustus.....  | 34 |
| Aineiston jakaminen <i>in situ</i> -aineistoon ja kaukokartoitusaineistoon ..... | 35 |
| Aineiston varsinainen analysointi .....  | 36 |
| Korrelaatioiden tarkastelu .....   | 36 |
| Yleistetyt additiiviset mallit .....   | 36 |
| Muuttujien tärkeys malleissa.....  | 37 |
| Alueelliset ennusteet.....   | 37 |
| Tulokset .....   | 37 |
| Vuo-muuttujat .....  | 37 |
| Esimerkki vuoarvoiksi muutetun aineiston tarkastelusta.....                      | 40 |
| Vuoarvojen karsinta.....   | 41 |
| Valovastekäyrät .....  | 41 |
| NEE, ER ja ennustetut GPP-arvot.....   | 44 |
| Spatiaalinen autokorrelaatio.....  | 45 |
| Ympäristömuuttujat.....  | 46 |
| Lämpötilamuuttujat.....  | 47 |
| In situ -aineisto .....  | 48 |
| Kaukokartoitusaineisto .....   | 50 |
| Yleistetyt additiiviset mallit .....   | 51 |
| GAM-mallit, kaukokartoitusaineisto .....   | 51 |
| GAM-mallit, in situ -mittaukset .....  | 52 |

|   |    |
|---|----|
| Mallien validointi .....                      | 53 |
| Selittävien muuttujien tärkeys malleissa..... | 54 |
| Alueelliset ennusteet.....                    | 55 |
| Tulosten tarkastelu .....                     | 57 |
| Luotettavuustarkastelu.....                   | 59 |
| Mittauksien vuorokaudenaika .....             | 59 |
| Kauluksiin liittyvä epävarmuus.....           | 60 |
| Kaulusten paikkojen valinta .....             | 61 |
| Ilman lämpeneminen kammion sisällä .....      | 62 |
| Himmennettyjen mittausten määrä.....          | 62 |
| NDVI-aineiston resoluutio.....                | 63 |
| Mittaushetken sääolot .....                   | 64 |
| Vihreä biomassa .....                         | 64 |
| Tunturikoivikon alue .....                    | 64 |
| Kammion himmennys.....                        | 65 |
| Muita huomioita .....                         | 65 |
| Jatkotutkimus .....                           | 65 |
| Otoskoko .....                                | 65 |
| Mikrometeorologinen kovarianssimenetelmä..... | 66 |
| Valaistusolosuhteiden hallinta .....          | 66 |
| Johtopäätökset.....                           | 67 |
| Kiitokset.....                                | 67 |
| Kirjallisuus.....                             | 68 |
| Liitteet.....                                 | 76 |

## Johdanto

Ilmaston lämpenemisen takia kasvillisuuden odotetaan lisääntyvän pohjoisilla alueilla (Myers-Smith ym., 2011) ja tundralla etenkin pensaikot lisääntyvät (Mod ja Luoto, 2016). Kasvukausi pidentyy, ja nousevan lämpötilan johdosta myös ravinteiden kierto nopeutuu (Ernakovich ym., 2014). Muutos todennäköisesti lisää sekä hiilidioksidin sitoutumista että vapautumista mahdollisesti niin, että hiilidioksidin vapautuminen ylittää vuositasolla sen sitoutumisen tundra-alueilla (Webb ym., 2016). Koska ilmastonmuutoksen odotetaan olevan voimakasta erityisesti tundra-alueilla (IPCC, 2013), voidaan siellä tehtyjä havaintoja pitää varoituksena laajemmista globaaleista muutoksista (Shaver ym., 1992).

Hiilidioksidivuolla tarkoitetaan hiilidioksidin virtausta ilmakehän sekä kasvillisuuden ja maaperän välillä. Hiilidioksidivuon osakomponentteja ovat fotosynteesi ja respiraatio. Lämpötilan nousun vaikutus arktisen alueen hiilidioksidivuohon ei ole yksiselitteinen asia, vaan siihen vaikuttavat voimakkaasti paikalliset olosuhteet (Oberbauer ym., 2007). Hiilidioksidivuon spatiaalisen jakautumisen mallintamisessa on vielä epävarmuutta ja varaa edistyä (Han ja Tokunaga, 2014; McGuire ym., 2009). Fotosynteesin ja respiraation osalta lämpötilan vaikutus on myös erilainen. Kokeellisen lämmittämisen on tutkimuksissa todettu lisäävän hiilidioksidin vapautumista ilmakehään respiraationa (Oberbauer ym., 2007; Zhou ym., 2016), mutta fotosynteesin määrään lämmittämisen vaikutus ei ole yhtä selvä (Fu ym., 2013).

Maisemamittakaavan alueellista tutkimusta tehtäessä on pystyttävä mittaamaan ilmiön voimakkuutta paikallisesti eri puolilta haluttua aluetta. Tarvitaan siis mittausvälineistö, jolla voidaan mitata sekä respiraatiota että fotosynteesiä ja joka on kohtuullisella vaivalla liikuteltavissa vaihtelevassa maastossa. Tällaiseen tarpeeseen vastaa kammiomittausmenetelmä (Matsuura, 2011). Lisäksi mittausvälineistö on saatava toimimaan ilman sähköverkkoa.

## Tutkimuskysymykset

Tarkastelen tässä työssä mitkä ympäristömuuttujat selittävät hiilidioksidivuota ja etenkin sen komponenttien spatiaalista vaihtelua, ja miten hiilidioksidivuota voi mallintaa alueellisesti. Merkittävänä osana tutkimusta on myös kammiomittausmenetelmän mahdollisuuksien ja rajoitusten selvittäminen työskenneltäessä tutkimusalueella, jolla voidaan liikkua ainoastaan jalan paikoin hankalassa maastossa eikä sähköverkkoa ole käytettävissä.

1. Mitkä ympäristömuuttujat vaikuttavat hiilidioksidivuohon maisemamittakaavassa tarkasteltuna?

Hypoteesi: Kasvillisuuden määrän voi odottaa vaikuttavan hiilidioksidivuon suuruuteen. Lämpötilat ovat hiilidioksidivuolle tärkeitä ympäristömuuttujia (Elberling ym., 2008; Fu ym., 2013; Oberbauer ym., 2007)

2. Voidaanko hiilidioksidivuota mallintaa alueellisesti maisemamittakaavassa?

Hypoteesi: Hiilidioksidivuon osatekijöistä fotosynteesillä on yhteys kaukokartoituksella hankittavissa oleviin muuttujiin, kuten kasvillisuuden määrää kuvaavaan NDVI:in (Marushchak ym., 2013; Shaver ym., 2013; Whiting, 1994), mikä mahdollistaa mallintamisen.

3. Soveltuuko kammiomenetelmä hiilidioksidivuon alueelliseen tutkimiseen maisemamittakaavassa erämaa-olosuhteissa?

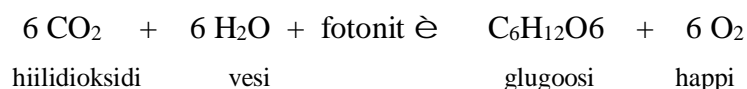
Hypoteesi: Kammiomenetelmällä on todettu toimivaksi mm. Ruotsin ja Alaskan tundralla (Shaver ym., 2013; Shaver ym., 2007) sekä Siperiassa (Curasi ym., 2016) ja Grönlannissa (Cahoon ym., 2016). Alueellisen näkökulman vaatimat suuret ympäristögradientit vaativat kuitenkin runsasta liikkumista vaikeakulkuisilla alueilla sähköverkon ulkopuolella. Koska menetelmä on uusi Geotieteiden ja maantieteen laitoksen käytössä, on menetelmän käytännöllisyyden ja luotettavuuden selvittäminen olennaisessa osassa tätä tutkimusta.

# Teoreettinen tausta

## Fotosynteesi

Fotosynteesi on prosessi, jonka avulla kasvi muuttaa auringon säteilyenergian kemialliseksi energiaksi. Valon osuessa kohteeseen osa valon aallonpituuksista välittyy suoraan läpi, osa heijastuu takaisin ja osa absorboituu. Kasvi absorboi antennipigmenttien keräämät fotonit lehtien kloroplasteissa olevalla klorofyllillä, ja käyttää energian kemiallisen reaktion ajamiseksi (Björn, 2015; Lawlor, 2001).

Fotosynteesin kemiallista reaktiota kuvataan perinteisesti yhtälöllä (Lawlor, 2001):



Kyseessä on pelkistysreaktio, jossa käytetään valoa, ilmakehän hiilidioksidia sekä vettä. Sivutuotteena syntyvä happi vapautuu ilmakehään (Plaxton ja Podestá, 2006). Todellisuudessa reaktio on huomattavasti monimutkaisempi, jopa 50 eri välireaktiota on pystytty yksilöimään (Taiz ja Zeiger, 2010). Yhtälö antaa kuitenkin hyvin käsityksen siitä mistä fotosynteesissä on kysymys. Fotosynteesi saa energian valosta, joka on siten oleellinen osa fotosynteesiin liittyvää tutkimusta. Fotosynteesin määrää rajoittaa valon määrä, kunnes saavutetaan saturaatiotaso (Taiz ja Zeiger, 2010). Valoa voi olla tietyissä olosuhteissa liikaakin, jolloin fotoinhibitio alkaa rajoittaa fotosynteesiä (Raghavendra, 2000).

## Fotosynteettisesti aktiivinen PAR-säteily

Valolla on hiukkasluonne (fotonit) sekä aaltoluonne, ja jokaisella fotonilla on tietty energia jonka määrä riippuu aallonpituudesta (Björn, 2015). PAR-säteilyllä (photosynthetically active radiation) tarkoitetaan valon aallonpituuden 400 nm - 700 nm aluetta (Jacovides ym., 2004; Tsubo ja Walker, 2005), jota kasvit absorboivat ja voivat käyttää energiana yhteyttämisessä (Darko ym., 2014; Mariscal ym., 2000). Aallonpituusalue on käytännöllisesti katsoen sama kuin ihmiselle näkyvän valon alue (Hikosaka ym., 2016).

PAR-säteilyn määrä mitataan PPFD:nä (photosynthetic photon flux density), jonka yksikkö on  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Tämä lukema kertoo mikromoleina, kuinka paljon fotoneita

osuu neliömetrin alueelle yhden sekunnin aikana. Termistö saattaa vaikuttaa monimutkaiselta koska välillä kirjallisuudessa puhutaan PPFD:n mittaamisesta (Street ym., 2007) ja välillä PAR-säteilyn mittaamisesta (Cahoon ym., 2012; Curasi ym., 2016; Shaver ym., 2013). PAR-säteilyn mittaaminen näyttää olevan terminä yleisempi käytäntö. Tieteellisesti oikeampi tapa olisi puhua PPFD:n mittaamisesta koska mittayksikössä on fotoneita, mihin PPFD viittaa. PAR-säteily voidaan mitata myös tehona, jolloin yksikkönä on  $W\ m^{-2}$ . Fotosynteesiin liittyvässä tutkimuksessa ei kuitenkaan käytetä tätä muotoa (Björn, 2015), koska säteily vaikuttaa fotosynteesiin kvantteina. PAR-säteily voidaan jakaa kohtisuoraan auringosta tulevaan säteilyyn ja heijastuneeseen säteilyyn (Hikosaka ym., 2016). Esimerkiksi pilvisellä säällä heijastunut säteily on vallitseva. Tässä tutkimuksessa en erottele heijastunutta ja suoraa säteilyä ei toisistaan.

## Respiraatio

Respiraatio on fotosynteesille käänteinen reaktio jossa fotosynteesissä pelkistetyt yhdisteet hapetetaan ilmakehän happea käyttäen hiilidioksidiksi, tällöin vapautuu energiaa kasvin käyttöön (Plaxton ja Podestá, 2006; Taiz ja Zeiger, 2010). Käytännössä fotosynteesin ilmakehästä sitoma hiilidioksidi palautuu prosessissa ilmakehään. Jo saman päivän aikana voi sidotusta hiilidioksidista palautua 30% - 70% riippuen kasvin tyypistä ja olosuhteista (Millenaar ja Lambers, 2003).

Ekosysteemin respiraatio (ER) jakautuu kasvin toimintaan liittyvään autotrofiseen respiraatioon ( $R_{aut}$ ), ja maaperän mikrobien hajotustoimintaan liittyvään heterotrofiseen ( $R_{het}$ ) respiraatioon (Jacobson, 2000; Luyssaert ym., 2010). Näiden voimakkuutta ohjaavat osittain eri tekijät (La Puma ym., 2007). Autotrofista respiraatiosta esiintyy myös maaperässä kasvien juurissa (Elberling ym., 2008), mikä on mittaamalla vaikea erottaa maaperän hajotustoiminnan heterotrofisesta respiraatiosta. Maaperän respiraatiossakin on erikseen eroteltavissa  $R_{het}$  ja  $R_{aut}$ , mutta siihen liittyvä tutkimus vaatii kaasujen isotooppianalyysijä (Cahoon ym., 2016)

## Fotorespiraatio

Elävän kasvin toimintoihin liittyvä autotrofinen respiraatio jakaantuu valoisassa tapahtuvaan fotorespiraatioon sekä pimeärespiraatioon (Lawlor, 2001). Fotorespiraation erottelu mittauksissa fotosynteesistä on hankalaa, vaikkakin siihen on olemassa matemaattisia menetelmiä (Hikosaka ym., 2016). Tutkimuksissa

joissa sovitetaan valovastekäyriä, fotorespiraatio nähdään kiinteänä fotosynteesiä vähentävänä komponenttina erottelematta sitä erikseen. Asiaa ei usein edes mainita (Marushchak ym., 2013; Shaver ym., 2013; Street ym., 2007). Tällöin fotosynteesiä tutkitaan siten että fotorespiraatio on jo suoraan vähennettynä tuotannosta, kuten tässäkin tutkimuksessa.

## Hiilidioksidivuon ja prosessit

Hiilidioksidivuolla ( $CO_2$  flux, mitataan massayksikkönä tai mooleina aikayksikköä ja pinta-alaa kohden) tarkoitetaan hiilidioksidin kulkeutumista ilmakehän sekä kasvillisuuden ja maaperän välillä. Oleellisia käsitteitä ovat GPP, NPP, NEE ja ER (kuva 1). GPP (gross primary production, ekosysteemin bruttotuotanto) on kasvillisuuden ilmakehästä fotosynteesissä sitoman hiilidioksidin määrä (Jacobson, 2000; Kirschbaum ja Mueller, 2001). Ekosysteemin nettovaihto (net ecosystem exchange, NEE), varsinainen hiilidioksidivuon, on GPP:n ja ekosysteemin respiraation (ER) erotus. Nettotuotanto (net primary production, NPP) on GPP vähennettyä ilmakehään kasvin autotrofisen respiraation ( $R_{aut}$ ) vaikutuksesta palaavan hiilidioksidin määrällä (Jacobson, 2000; Luyssaert ym., 2010). NEE:n suunta vuositasolla kertoo, onko kohde hiilidioksidinielu vai lähde (Pumpanen ym., 2004). Nämä käsitteiden väliset yhteydet voidaan tiivistää kahteen yhtälöön (Luyssaert ym., 2010; Shaver ym., 2013):

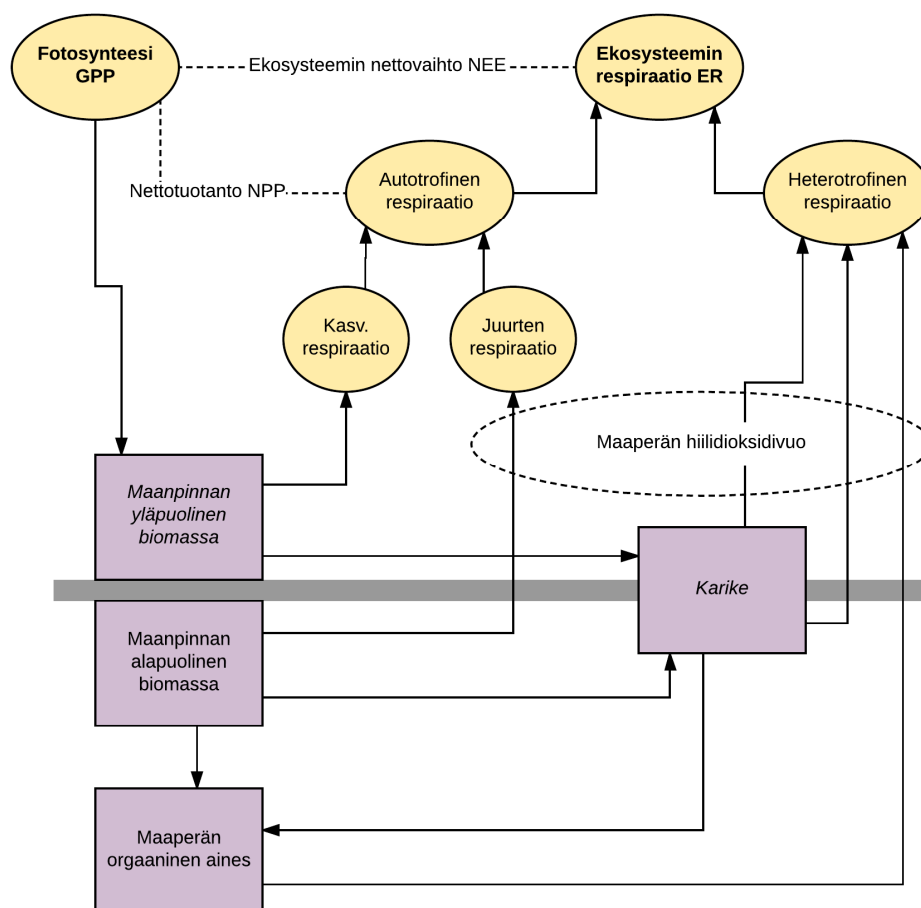
$$NEE = ER - GPP$$

$$NPP = GPP - R_{aut}$$

Lisäksi esiintyy myös herbivorien respiraatiota, johon osa kasvin sitomasta hiilidioksidista siirtyy herbivorin syödessä kasvia (Tagesson, 2006). Herbivoria voi vaikuttaa alueiden hiilitaseeseen myös kasvillisuuden rakenteen kautta. Yhteyttävän biomassan määrä on pienempi, mikäli sitä päätyy merkittäviä osuuksia herbivorien ravinnoksi (Cahoon ym., 2012).

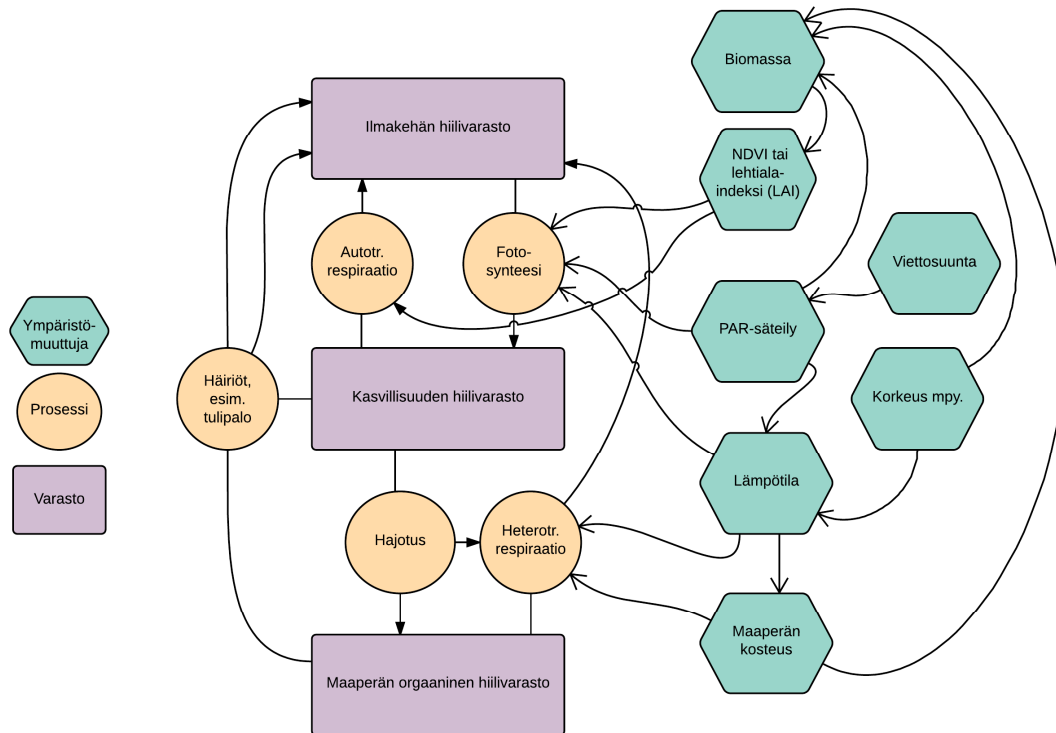
Hiilidioksidivuon lisäksi alueelliseen hiilitaseeseen vaikuttaa myös metaanivuon, jota esiintyy maaperässä hapettomissa olosuhteissa muodostuvan metaanin purkautuessa maan pinnalle (Elberling ym., 2008). Tämän lisäksi vesistöt kuljettavat liuennutta orgaanista (dissolved organic carbon, DOC) ja liuennutta epäorgaanista hiiltä (dissolved inorganic carbon, DIC) (Tue-Ngeun ym., 2005). Herbivorien osuutta,

metaanivuota tai vesistön kuljettamaa hiiltä ei kuitenkaan käsitellä tässä tutkimuksessa. Hiilen kiertoon ja hiilidioksidivuohon liittyy varastoja, prosesseja sekä ympäristömuuttujia (Kuva 2.) Tässä tutkimuksessa keskitytään prosesseihin (fotosynteesi ja respiraatio) sekä ympäristömuuttujiin (esim. lämpötila)



**Kuva 1. Hiilidioksidivuohon liittyviä käsitteitä. Nuoli kuvaa hiilen kulkusuuntaa. NEE (ekosysteemin hiilidioksidin nettovaihto, net ecosystem exchange) muodostuu GPP:n (bruttotuotanto, gross primary production) ja ER:n (ekosysteemin respiraatio, ecosystem respiration) erotuksesta. ER jakaantuu kasvillisuuden muodostamaan autotrofiseen respiraatioon sekä mikrobien ja maaperän monisoluisten eläinten hajotustoiminnan muodostamaan heterotrofiseen respiraatioon. NPP (nettotuotanto, net primary production) on GPP:n ja autotrofisen respiraation erotus. Osa autotrofisesta respiraatiosta tapahtuu maan pinnan alla kasvin juurissa. Mikäli mitataan maaperän hiilivuota, tulee mukaan myös autotrofista respiraatiota kasvin juurien osalta. Tutkimuksen vastemuuttujat on vahvennettu, selittävät muuttujat kursivoitu. (Jacobson, 2000; Kirschbaum ja Mueller, 2001) mukaan tekijän piirtämä.**





**Kuva 2. Hiilidioksidivuohon liittyvät varastot (suorakaide), prosessit (ympyrä) ja merkittävimmät ympäristömuuttujat (heksagoni). Nuolet joissa on umpinainen musta pää kuvaavat hiilen kiertoa, nuolet avoimella nuolen päällä kuvaavat ympäristömuuttujien vaikutusta. Aiempia tutkimuksia mukaillen tekijän piirtämä (Elberling ym., 2008; Fu ym., 2013; Oberbauer ym., 2007; Tagesson, 2006).**

## Aiempi tutkimus

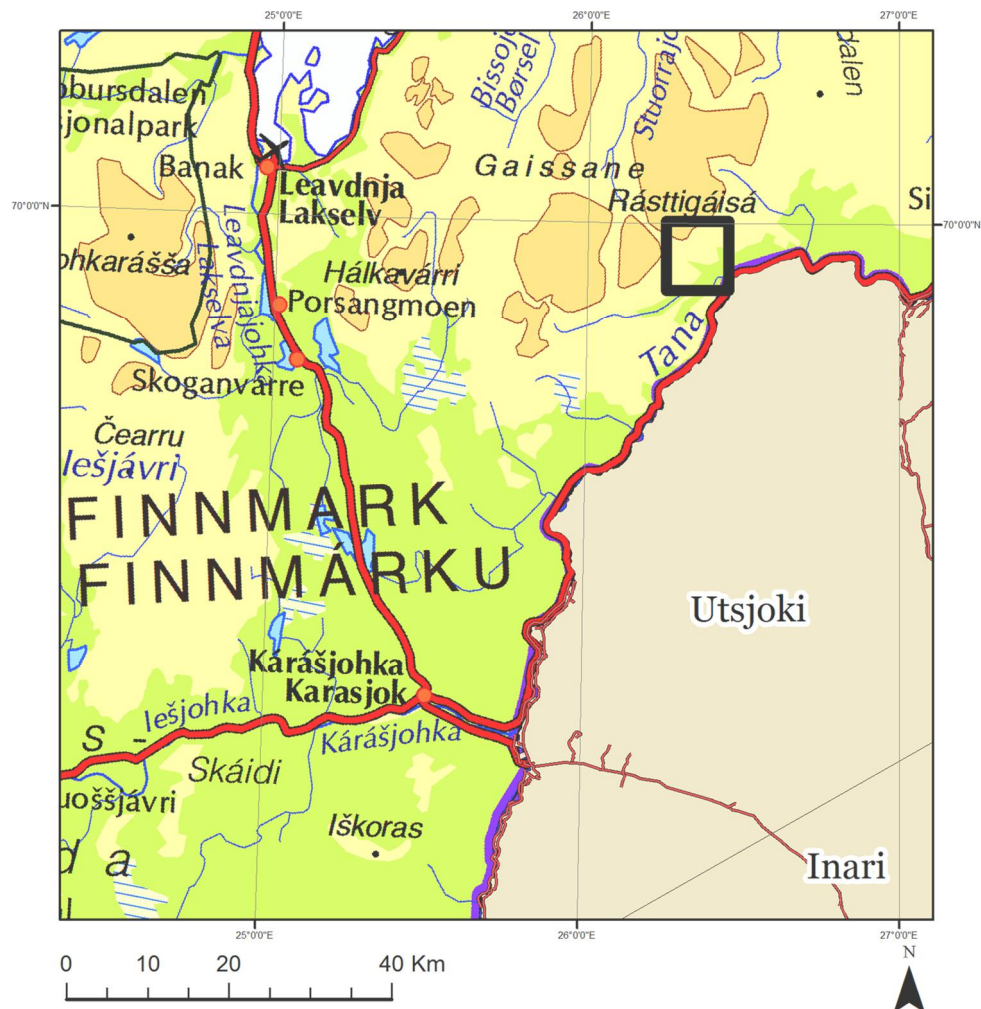
Aiemmin on tutkittu mm. metsien maaperä, kenttä- ja pohjakerroksen hiilidioksidivoita (Kulmala ym., 2014; Pumpanen ym., 2012) sekä mm. palsasoiden hiilivuota (Nykänen ym., 2003). Arktis-alpiinisella alueella hiilidioksidivoita on melko laajalla otannalla tutkinut Shaver (Shaver ym., 2007; 2013) tarkoituksenaan mallintaa hiilidioksidivuota arktisella alueella. Hänen tutkimuksissaan mallinnus on onnistunut melko luotettavasti käyttämällä parametreina lehtialaindeksiä, PAR-säteilyä ja lämpötilaa. Mallinnus näyttää arktisella alueella onnistuvan erottelematta alueen kasvillisuuden lajistoa.

Curasi (2016) on tutkinut vesien kulkureittien vaikutusta hiilidioksidivuohon Siperian tundralla käyttäen Shaverin menetelmiä. Veden kulkureittien varsilla näyttää olevan korkeampia GPP ja ER arvoja. Cahoon ym. (2016) on tutkinut arktisen maaperän respiraatiota ja todennut, että mikäli maaperän respiraation voi erotella heterotrofiseen ja autotrofiseen, on mahdollista tunnistaa ekosysteemejä jotka eivät ole enää

tasapainossa. Cahoon ym. (2012) on myös aiemmin tutkinut herbivorien vaikutusta hiilidioksidivuohon Grönlannissa ja todennut suurten herbivorien kokeellisen pois rajaamisen kasvattaneen alueen hiilinielua merkittävästi.

Ronkainen (2009) on tutkinut hiilidioksidivuota Venäjän tundralla. Hänen mukaan biomassalla on merkitsevä korrelaatio sekä nettovaihdon että tuotannon osalta, kun taas maan ja ilman lämpötilat vaikuttavat erityisesti respiraation määrään. Ilmastonmuutoksen vaikutusta maaperän respiraatiolle ei ole aiemmasta tutkimuksesta huolimatta yksiselitteisesti määritelty (Wang ym., 2014). Haasteita aiheuttavat mm. maaperän respiraation suuri spatiaalinen vaihtelu ja kohteiden vaikeahko saavutettavuus (Bond-Lamberty ja Thomson, 2010).

## Tutkimusalue



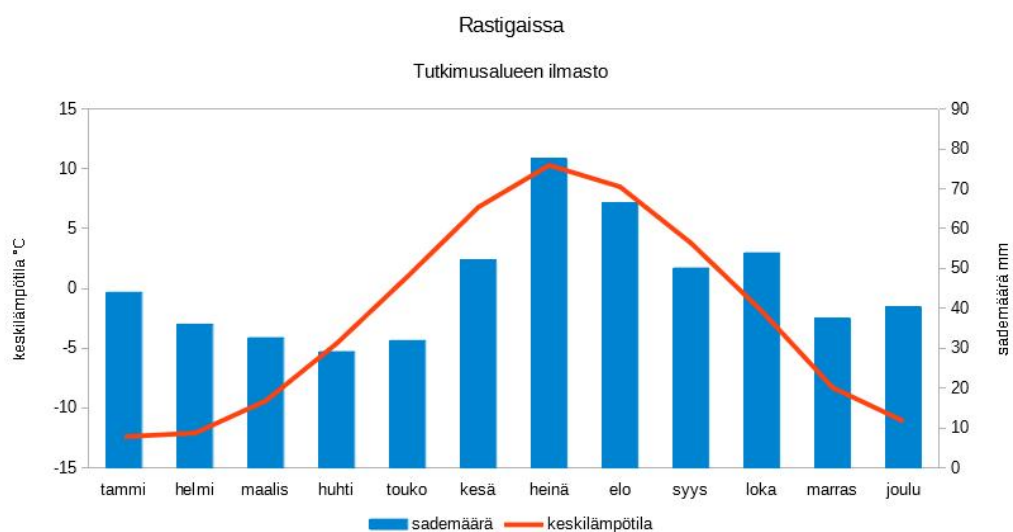
Kuva 3. Tutkimusalue sijaitsee Pohjois-Norjassa Suomen rajan tuntumassa. Korkeus alueella vaihtelee 121 m m.p.y. ja 1004 m m.p.y. välillä. Etäisyys lähimmälle Jäämeren rannalle on n. 40 km. Vuotuinen keskilämpötila jää alle nollan ollen  $-2,5^{\circ}\text{C}$ .

Tutkimusalue sijaitsee Skandinavian pohjoisosassa Finnmarkin läänissä Rásttigáisá-tunturin ympäristössä (N  $69^{\circ}57'$  E  $26^{\circ}23'$ ) (kuvat 3. ja 4.). Alue valittiin kattavien ympäristögradienttien sekä alueella tehtävän muun tutkimuksen tarjoamien synergiaetujen ja kohtuullisen matkan päässä olevan Turun yliopiston Kevon tutkimusaseman tarjoamien palveluiden vuoksi.



**Kuva 4.** Tyypillistä maisemaa tutkimusalueella. Kivikkoinen maasto on koko alueelle varsin yleistä. Kuvassa on etualalla enimmäkseen variksenmarjaa (*Empetrum nigrum ssp. hermaphroditum*). Taustalla näkyy Rástigáisá:n kaakkoisrinne lumenviipymineen.

Kylmin kuukausi tutkimusalueella on tammikuu (keskiarvo  $-12,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , keskimääräinen minimi  $-15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ja lämpimin heinäkuu (keskiarvo  $10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , keskimääräinen maksimi  $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (kuva 5). Koko vuoden keskilämpötila on  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sateisinta on heinäkuussa ( $77,5\text{ mm}$ ) ja kuivinta huhtikuussa ( $29\text{ mm}$ ). Koko vuoden sademäärä on  $551\text{ mm}$ . Ilmastotiedot on mallinnettu 947 sääaseman tiedoista vuosilta 1980 - 2010 (Aalto ym., 2017). Aineiston mallinnus on rajattu tarkasti tutkimusalueelle.

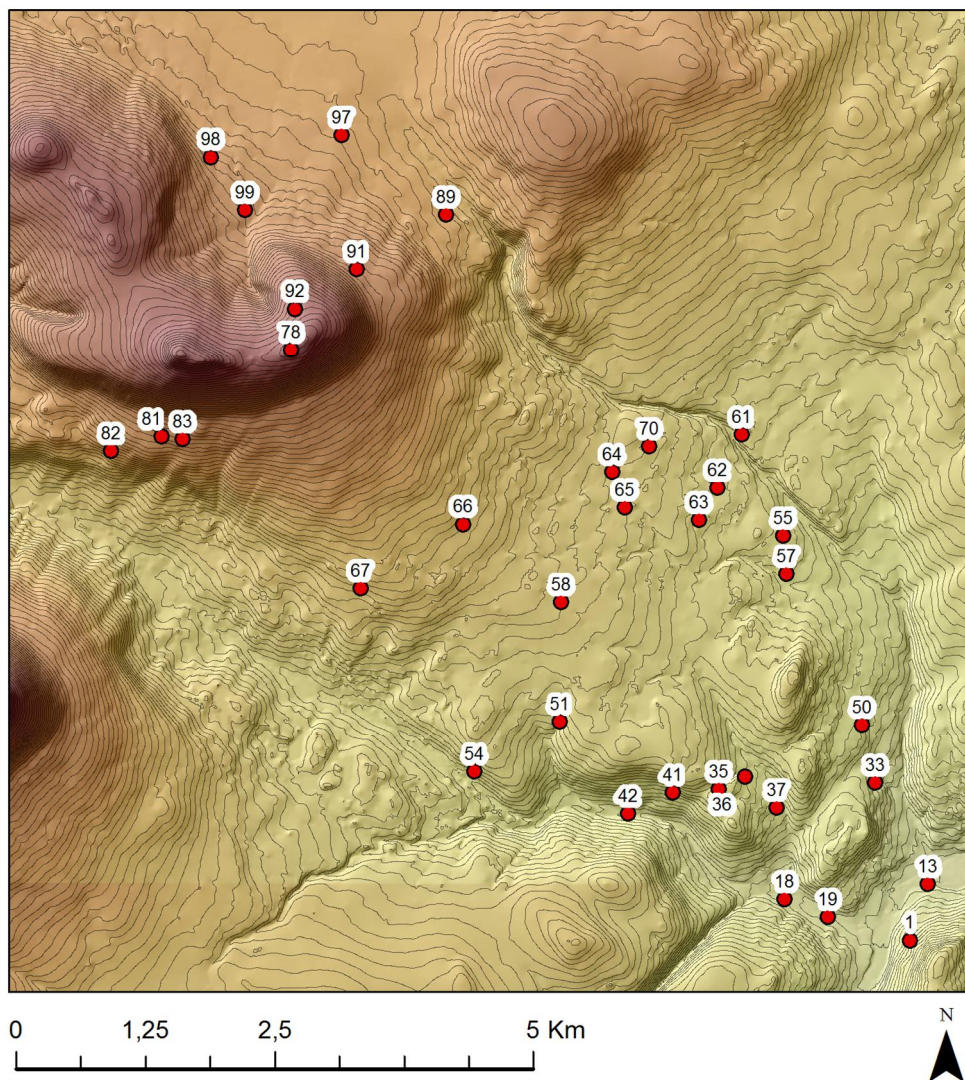


**Kuva 5.** Tutkimusalueen ilmastodiagrammi. Tiedot on mallinnettu 947 sääaseman tiedoista vuosilta 1980 - 2010 (Aalto ym., 2017). Arvot on laskettu mallista tarkasti rajatusti tutkimusalueelle.



Tutkimuksessa katettiin korkeusgradientti välillä 121 m m.p.y. ja 1004 m m.p.y. Suuri korkeusero kohtuullisen pienellä etäisyydellä tarjoaa monenlaisia olosuhteita kasvillisuudelle, laaksojen rehevästä kasvillisuudesta tunturin huipun karuun maastoon. Suora ihmistoiminta tutkimusalueella on ollut vähäistä, ainoastaan yksi merkitty polku johtaa Rástigáisá:n huipulle alueen läpi. Välillisesti ihmistoiminnalla on kuitenkin vaikutusta alueella porojen laidunnuksen kautta.

## Koealat



Kuva 6. Koealojen sijoittuminen tutkimusalueelle. Taustalla on korkeusmalli, rinnevalovarjostus ja korkeuskäyrät 10 metrin käyrävälillä. Koealojen korkeus vaihtelee 121 metristä 1004 metriin. Korkeusmalli on Norjan maanmittausviranomaisten tuottama (Kartverket, 2017).

Tutkimusalueella tehtiin samaan aikaan myös monenlaista muuta ekologista tutkimusta. Sitä varten alueelta oli valittu ositetulla otannalla 103 koealaa siten, että korkeus, kosteus, säteily ja kasvillisuusindeksi ja lumen sulamispäivä tulivat gradientteina katetuksi monipuolisesti. Hiilidioksidivuomittauksia tehtiin valikoidusti samoilta koealoilta.

Menetelmän käytöstä ei ollut laitoksellamme aiempaa kokemusta varsinkaan haastavissa kenttäoloissa. Mitattavien koealojen lopullinen määrä ja sijainnit valikoituivatkin vasta maastotyövaiheessa mainituista 103:sta vaihtoehdosta koska työn kulun, tekniikan toimivuuden ja maastossa kulkemisen määrittelemät rajoitteet eivät olleet tarkasti tiedossa etukäteen. Käytännössä kolmen kenttäjakson aikana (liite 4). Ehdimme mitata 34 koealaa, jotka jakautuivat n. 50 km<sup>2</sup>:n alueelle (kuva 6).

## Menetelmät

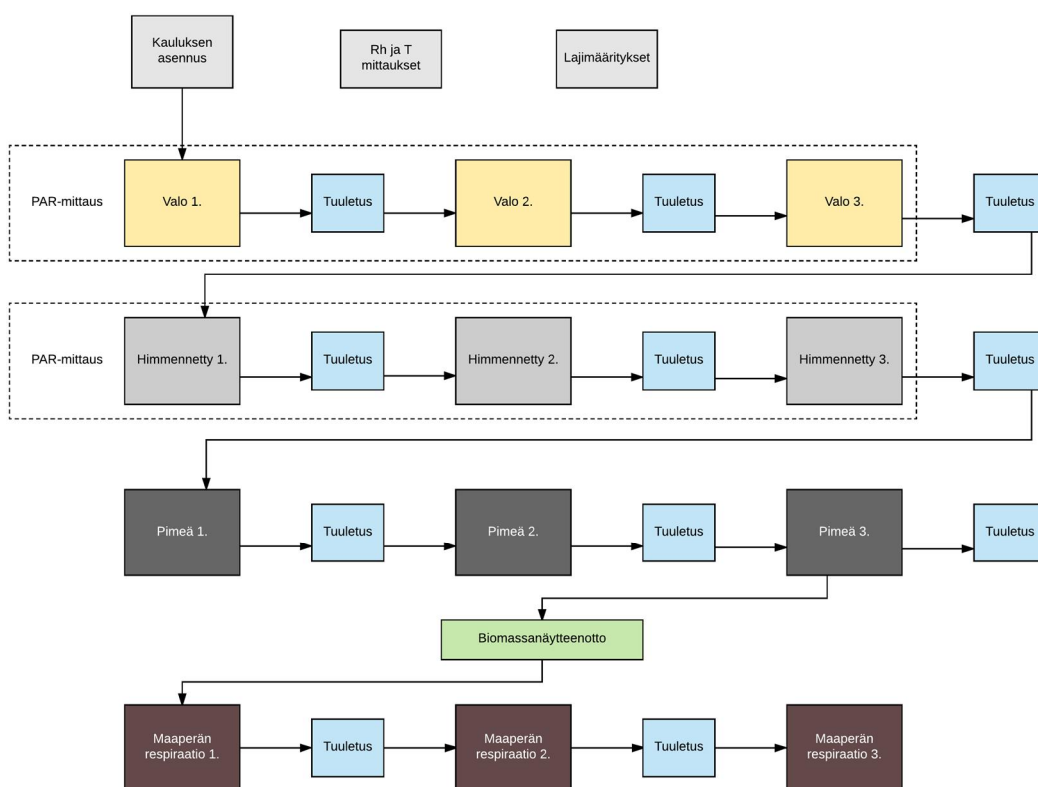
### Mittausmenetelmä

Hiilidioksidivuota voi mitata erilaisilla kammiomenetelmillä (Livingston, 1995), maaperän pitoisuusgradienttimenetelmällä (Pumpanen ym., 2008) tai mikrometeorologisella kovarianssimenetelmällä (Aubinet ym., 2012). Tässä tutkimuksessa oli käytössä staattinen suljettu kammio (Livingston, 1995; Pumpanen ym., 2004). Menetelmä on edullinen ja kammio helposti siirreltävässä mahdollistaen siten spatiaalisen vaihtelun tutkimisen (Matsuura, 2011).

Maan pinnalle asetetaan kammio, ja sisälle jäävän ilman hiilidioksidipitoisuuden muutosta tarkkaillaan ajan funktiona mittaamalla pitoisuus säännöllisin väliajoin. Mittauksia voi tehdä erilaisella tallennustiheydellä ja eri mittausajoilla. Pitkä mittausaika tiheällä tallennusvälillä on tarkka mutta vie aikaa ja kuluttaa paljon laitteen muistia. Lyhyt aika harvalla tallennusvälillä voi puolestaan olla epäluotettava. Aiemmissa tutkimuksissa on käytetty erilaisia mittausaikoja, esimerkiksi 60 s mittausaika 2 s tallennusvälillä (Cahoon ym., 2012), ja vastaavasti 60 s / 1s (Curasi ym., 2016) 200 s / 20 s (Arndal ym., 2009), 180 s / 15 s (Bäckstrand ym., 2008) ja 300 s / 60 s (Susiluoto ym., 2008).

Liisa Kulmala (2015) neuvoi mittausajan pituudessa ja etenkin pienen vuon tutkimusaloilla ajan olisi hyvä olla 4 - 5 minuuttia. Tunturiolosuhteissa kasvillisuutta on paikoin varsin niukasti, joten vuonkin voi sellaisissa paikoissa odottaa olevan kohtuullisen pieni. Käytin tallennusvälinä 30 sekuntia ja mittausaikana viittä minuuttia. Mittausajan ei olisi kuitenkaan ylittää tuota viittä minuuttia, muuten vuo voi alkaa vääristyä kammion sisällä olevan ilman ja maan välisen konsentraatiogradientin ajaman diffuusion pienentyessä (Davidson ym., 2002).

Mittauksia tehtiin kirkkaassa valossa, himmennettynä sekä biomassanäytteenoton jälkeen, kaikkia kolme rinnakkaismittausta. Eri mittausten välillä kammio tuuletettiin hiilidioksidipitoisuuden palauttamiseksi ilmakehän vallitsevaan arvoon. Valoisassa ja himmennettynä tehtyjen mittausten yhteydessä mitattiin auringon PAR-säteily. Työn kulku koealalla on esitetty kaaviona kuvassa 7.



**Kuva 7.** Kuvaus työn kulusta koealalla. Aluksi asetettiin kaulus paikoilleen. Valomittaukset ja himmennetyt mittaukset tehtiin mittaamalla samalla jatkuvasti PAR-säteilyä. Sopivissa väleissä mitattiin maaperän kosteus ja lämpötila sekä määritettiin lajin peittoprosentit. Pimeämittausten ja maaperämittausten välissä otettiin biomassanäytteet. Kukin hiilidioksidivuomittaus kesti viisi minuuttia. Kaikki mittaukset ja määritykset tehtiin erikseen koealan A- ja B-mittauskauluksille. Kokonaisuudessaan yhden koealan tutkimiseen kului aikaa noin kaksi tuntia.

Pimeämittauksella saadaan selville respiraation määrä, ja viimeisellä biomassanäytteenoton jälkeen tehtävällä mittauksella selvitetään maaperän osuus ilmaan palaavasta hiilidioksidista (Illeris ym., 2004). Himmennettyä aineistoa käytetään valovastekäyrien sovittamiseksi (Cahoon ym., 2012; Shaver ym., 2007; Street ym., 2007). Valovastekäyrien avulla voidaan tutkia eri koealojen mittauksia vertailukelpoisesti ennustamalla vuoarvo samalle valotasolle kaikilla koealoilla (Cahoon ym., 2012). Kaikkiaan yhden koealan tutkimiseen kului aikaa n. kaksi tuntia

## Mittausvälineistö

### Kammio

Mittauksessa käytimme Jukka Pumpasen Helsingin yliopistolla suunnittelemaa suljettua kammiota (NSNF-3) (Pumpanen ym., 2004). Kammio on valoa läpäisevää polykarbonaatista valmistettu 240 mm korkea halkaisijaltaan 200 mm leveä toisesta päästään umpinainen ja toisesta päästä avoin lieriö (kuvan 8. vasemmassa reunassa).



**Kuva 8. Mittauslaitteisto vasemmalta lukien: Kammio puhaltiminen, hiilidioksidianturi ilman suodatinta ja suojusta, ilmentekustanturi, PAR-säteilymittari, puhaltimen lyijyakku ja datankerulaite.**



Kammiossa on asennusaukot hiilidioksidianturia sekä ilmankosteus- ja lämpötila-anturia varten. CO<sub>2</sub>-anturille kammiossa on valmistajan toimittama asennuspidike tiivisteineen, ilmankosteusanturille on sähkökaapeliin läpivientiin alun perin tarkoitettu vedonpoistoliitin tiivisteineen. Kammio on täysin umpinainen, toisin kuin jotkut mallit missä on venttiili mahdollisten paineen nousu-ongelmien välttämiseksi (Pumpanen ym., 2010) Mittauksen aikana arvoja tarkkailtiin lukulaitteesta (kuva 9.)



**Kuva 9. Mittaus käynnissä 13.7.2015 tutkimusalalla 64, 420 m m.p.y. Sää on osin pilvinen, mutta PAR-säteilymittari oikealla alhaalla näyttää kuitenkin kohtuullista 634  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  arvoa.**

Kammion sisällä on pieni tuuletin sekoittamassa mitattavaa ilmaa ja siten varmistamassa hiilidioksidin tasaisen pitoisuuden eri puolilla kammiota. Tuuletin oli puhaltamassa ilmaa ylös kammion yläreunan suuntaan, koska maata kohti suuntautuva puhallus saattaa vääristää tulosta aiheuttamalla painetta maata vasten (Kulmala, 2015). Tuuletin saa käyttöjännitteen 12 V / 2 Ah lyijyhyytelöakusta.

Akkutyypin sopii hyvin tällaiseen hitaaseen varauksen purkamiseen. Lyijyhyytelöakut ovat edullisia, niitä on helposti saatavilla ja niiden lataaminen on varsin turvallista ja yksinkertaista. Akun navat on kuitenkin syytä muistaa suojata kuljetuksen ajaksi. Lyijyhyytelöakkujen huonona puolena voidaan pitää kohtuullisen suurta painoa esim. litium-akkuihin verrattuna. Samanlaista kammiota voidaan käyttää myös metaanivuon mittaamiseen vaihtamalla anturia. Tällainen kammio onkin yleinen menetelmä myös maasta vapautuvan metaanin mittaamiseen (Pihlatie ym., 2013).

#### Kammion kaulukset

Kammion asettamiseksi maahan käytettiin PVC (polyvinylchloride) -muovista valmistetusta putkesta leikattua kaulusta, joka asennettiin ensin tiiviisti maahan. Kaulus nopeutti työskentelyä, kammio on helppo asettaa paikalleen. Tiivistykseen käytimme

kvartsihiekalla täytettyä kangaspussia (kuva 8). Mikäli maaston muodot eivät olleet aivan tasaisia ja vuotoja oli sen takia odotettavissa, käytimme tiivistämisen apuna kiviä (kuva 10). Kiviä löytyi yleensä tarvittava määrä maastosta, joten niitä ei tarvinnut kantaa mukana.



**Kuva 10. Maaston ollessa epätasainen, käytettiin kiviä tiivistämään kvartsihiekkapussi kaulusta ja maata vasten.**

## Vallitsevan valaistuksen himmentäminen

Himmennettyjä mittauksia varten rakensin koottavan puisen kehon, johon kiinnitin kolme kerrosta hyttysverkkoa (kuva 11). Kolme kerrosta himmentävät valaistustason noin puoleen. Kehikko on kevyt ja kulkee hyvin rinkassa esim. teltan kanssa samassa nipussa. Hyttysverkkoa on käytetty himmennykseen myös aiemmassa tutkimuksessa, ja voidaan olettaa sen himmentävän kaikkia valon aallonpituuksia tasapuolisesti (Shaver ym., 2013; Street ym., 2007). Mittaustyön kannalta kehikko voisi olla suurempikin, mutta maastossa liikkumisen helpottamiseksi tein juuri kammion kokoisen kehon. Tarkalla asettelulla kehikko toimi kuitenkin moitteettomasti.



**Kuva 11. Etualalla säteilyn himmentämiseen käytetty puukehikkoon kiinnitetty hyttysverkko.**

Kammion pimentämiseen respiraatiomittauksia varten käytimme mustaa jätessäkkiä, jonka mittasin pimentävän PAR-säteilyn n. 99 prosenttisesti. Jätessäkki sopii myös hyvin kenttäolosuhteisiin keveytensä ja pienen tilantarpeensa ansiosta. Aiemmissa tutkimuksissa on käytetty mm. valoa läpäisemätöntä pressua tai kangasta (Shaver ym., 2013; Street ym., 2007). Myös alumiinisia pimentimiä on käytetty (Kulmala ym., 2008).

## Anturit ja datankeruulaite

Hiilidioksidipitoisuuksien mittaamiseen käytimme hiilidioksidianturia (Vaisala, 2013) yhdistettynä datankeruulaitteeseen (MI70, Vaisala, Vantaa, Suomi). Anturin toiminta perustuu lähi-infrapunasäteilyn absorptioon hiilidioksidissa (Vaisala, 2012). Mukana oli myös samaan datankeruulaitteeseen kytketty ilmankosteus- ja lämpötila-anturi (HM70, Vaisala, Vantaa, Suomi), jonka tietoa datankeruulaite käyttää

hiilidioksidipitoisuuden laskemisessa. Laitteisto hankittiin uutena juuri ennen kenttätövävaihtoa, ja anturit toimitettiin kalibroituina.

Ennen kenttäjaksoa koekäytössä kuitenkin huomasi, että laitteet näyttävät keskenään merkittävästi poikkeavia lukemia. Ero oli luokkaa 380 ppm ja 440 ppm. Kalibroitodistus ei siten välttämättä tarkoita, että laitteet näyttäisivät oikein. Omia tarkistusmittauksia on siis syytä tehdä ennen kentälle lähtöä. Ehdin kuitenkin käyttää anturit kalibroitavana valmistajan huollossa juuri ennen kenttäjaksoa ja takuukin oli onneksi voimassa. Laitteet olisi ainakin periaatteessa mahdollista kalibroida myös itse kytkeytymällä terminaaliohjelmalla ja sarjakaapelilla suoraan anturiin (Vaisala, 2013). Toimenpide vaatisi kuitenkin sopivat standardikaasut ja kaasun virtaamiseen liittyvät varusteet, joita ei ollut ainakaan nopeasti saatavilla.

GMP 343 -anturissa on irrotettava ilmansuodatin. Suodattimen tarkoituksena on estää epäpuhtauksien pääsy anturiin. Suodatin kuitenkin hidastaa hiilidioksidin kulkemista ilmasta anturiin ja siten nostaa anturin vasteaikaa. Haluttaessa nopeaa vasteaikaa (<2s) on myös mahdollista mitata ilman suodatinta (Vaisala, 2013). Tällöin on kuitenkin huolehdittava, ettei anturiin pääse mitään ylimääräistä ja tarvittaessa pudistettava anturia linssipaperilla. Tämä tutkimus tehtiin ilman suodatinta koska ilma tutkimusalueella on erittäin puhdasta eikä aiheuta riskiä anturin likaantumiselle.

Lisäksi anturissa on muovinen suoja suojaamassa anturia kuljetuksen aikana. Erittäin hankalissa olosuhteissa voidaan mitata myös siten että sekä suodatin että suoja ovat molemmat anturissa paikallaan, suojuskin sallii ilman kulkemisen anturille. Tärkeintä on kuitenkin huolehtia, että kaikki tutkimuksen mittaukset tehdään yhtenevällä käytännöllä suodattimen ja suojuksen suhteen, ja että kuljetuksen ajaksi huolehditaan suojat paikalleen.

Kokeilin ja mittasin mittalaitteiden akkujen kestoa huolellisesti useaan otteeseen ennen kentälle lähtöä, ja totesin että laitteet toimivat pisimmillään n. 8 tuntia yhdellä latauksella. Tämä otettiin huomioon kenttätöiden suunnittelussa. Kentällä jouduimme kuitenkin toteamaan, että mittalaitteen varaustilan näyttö ei toimi luotettavasti. Akun kestoa onkin selvästi parempi tarkkailla kellosta kuin laitteen varaustilan näytöltä.

Mittauksia suunniteltaessa on syytä laskea akun kesto varman päälle. Tässä tutkimuksessa se tarkoitti kuuden tunnin työskentelyä ja kolmea koealaa päivässä.

Siirtymiin kuluva ajan vuoksi akun latauksen puitteissa käytettävissä oleva mittausaika oli lopulta kuitenkin aivan riittävä. Laitteilla on mahdollista myös mitata ja ladata laitteen akkua samaan aikaan. Tällöin kentällä mukana kannettava varustus kuitenkin lisääntyy yhdellä tai kahdella akulla, mutta pidempienkin työpäivien tekeminen laitteiston puolesta olisi siis teknisesti mahdollista.

Hankin mittalaitteille erikseen veden- ja pölynpitävät salkut kuljetusta varten. Kammioille hankin retkeilykäyttöön tarkoitetut tiiviit kuivapussit suojaksi. Salkku olisi kuitenkin ollut kentällä epäkäytännöllinen, joten laitteita säilytettiin ja kuljetettiin kenttäjakson aikana kammioiden kanssa kuivapusseissa. Mittalaitteet pakattiin hyvin pehmustettuna kammion sisään kallisarvoisen tilan säästämiseksi. Pehmuste suojaa mittalaitteita, mutta yhtä lailla myös kammion sisäpintaa naarmuilta ja kolhuilta. Tällaista pakettia sai melko helposti kuljetettua rinkan ulkopuolelle kiinnitettynä. Aurinkopaneeli oli rullattavuutensa ansiosta hyvä kuljettaa teltan ympärille käärittyinä.

Mukana oli lisäksi työkaluja ja varaosia mahdollisten pienten ongelmien selvittelyä varten. Vaihdoinkin kentällä muutamaan kertaan liittimiä joilla kammion puhallin kytketään akkuun. Puhallin on alttiina kolhuille, mikäli kasvillisuus on korkeaa tai jos laitteita pakattaessa ei ole tarkkana. Puhaltimet toimivat kuitenkin moitteetta koko kenttäjakson ajan.

### Aineiston käsittely kentällä

Datankeruulaitteen tallennuskapasiteetti on varsin rajallinen, joten aineisto on purettava päivittäin tietokoneelle. Mittaustiedostojen purkamista varten mukana oli SSD-kiintolevyllä varustettu tietokone Windows-käyttöjärjestelmällä, sekä muutamia muistitikkuja varmuuskopioiden tekemistä varten. SSD-levy on suositeltava kenttäolosuhteisiin, koska siinä ei ole liikkuvia osia ja se ei siten ole yhtä herkkä tärähdyksille kuin perinteiset kiintolevyt. Tiedostojen siirtoon tarvitaan Vaisalan MI70-ohjelmisto, joka on ladattavissa Vaisalan verkkosivuilta. Ohjelma on saatavilla ainoastaan Windows-käyttöjärjestelmille.

Jokainen mittaus tallentuu omaksi \*.M70 tiedostokseen, joka saa nimeksi mittauksen ajankohdan. Onkin pidettävä minuutilleen kirjaa, mikä mittaus on tehty milloinkin ja varmistettava laitteiden kellojen olevan oikeassa ajassa. Useammalla laitteella

mitattaessa on myös yksilöitävä tarkasti, mikä mittaus on tehty milläkin laitteella. Kenttälomakkeessa (liite 2.) oli kohdat tarkalle mittauksen aloitusajalle.

Kentällä siirsimme tiedostot ensin tietokoneelle ja sitten muistitikuille, kaikki muu aineiston käsittely tehtiin myöhemmin. Tein kuitenkin leirissä jonkin verran suppeaa aineiston mielekkyystarkastelua MI70-ohjelman omien grafiikkaominaisuuksien turvin. Parhaassa tapauksessa leirissä oli matkapuhelinkenttää sen verran, että tiedostoja voitiin siirtää saman tien talteen pilvitallennuspalveluun mobiilidatan avulla.

#### Laitteiden akkujen lataaminen

Kentällä ei ollut käytössä sähköverkkoa, joten laitteet oli saatava ladattua jollain toisella keinolla. Käytinkin akkujen lataamiskäytäntöjen suunnitteluun huomattavan paljon aikaa. Päivän mittauksien jälkeen kaikki laitteet ja akut laitettiin lataukseen (kuva 12). Kaikkien eri akkujen lataamista varten mukana oli 28 watin tehoinen rullattava aurinkopaneeli (Powerfilm; Ames; Yhdysvallat) sekä 18 Ah:n AGM (absorbed glass mat) -tyyppinen emoakku (Powerfit; Milton; Yhdysvallat) sekä latausta valvova lataussäädin. Työpäivän aikana aurinkopaneeli latasi emoakkua, jota käytettiin illalla ja yöllä mittalaitteiden lataamiseen. Vaikka aurinko paistoi yölläkin, ei säteily ollut niin voimakasta, että laitteita olisi voinut ladata yöaikaan suoraan aurinkopaneelilla ilman emoakkua. Suoraan lataamisella olisi kuitenkin hieman parempi hyötysuhde. Kenttäjaksojen välissä kaikki akut ja laitteet ladattiin sähköverkosta Kevon tutkimusasemalla.

Kaikille sähköä kuluttaville laitteille oli omat 12 voltin jännitteellä toimivat laturinsa. Vaisalan mittalaitteille tällaista laturia ei kuitenkaan ollut kaupallisesti saatavilla. Niitä varten hankin alun perin kannettaville tietokoneille tarkoitetut laturit, joiden kytkemiseksi valmistin itse tarvittavat muunnoskaapelit. Samat laturit kävivät myös kentällä mukana olleen kannettavan tietokoneen lataamiseen.



**Kuva 12. Mittalaitteet ovat työpäivän jälkeen latautumassa päivällä aurinkopaneelilla ladatusta emoakusta. Kullekin laitteelle on erilainen laturinsa.**

Latausjärjestelmä osoittautui melko hyvin toimivaksi, paneeli latasi pienellä virralla heti kun aurinko hieman paistoi pilvien läpi. Paneelia käännettiin auringon suunnan mukaan parhaan hyötysuhteen saamiseksi (kuva 13). Laturit ja säätimet tuntuivat toimivan moitteettomasti, minkäänlaista akkujen lämpenemistä latauksen yhteydessä ei esiintynyt. Saimme ladattua järjestelmällä myös matkapuhelimiamme, mikä on turvallisuuden kannalta tärkeää kentällä.



**Kuva 13. Aurinkopaneeli on aseteltuna lataamaan emoakkua leirissä päivän mittausten ajaksi. Paneeli kannattaa kääntää aina vuorokaudenajan mukaan aurinkoa kohti parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi. Aamulla liikkeelle lähdettäessä voidaan ennakoida auringonvalon suunnan muutokset.**

### Ilmanpaineen mittaaminen

Ilmanpaine vaikuttaa hiilidioksidipitoisuuden mittaustuloksiin. Suuremmassa ilmanpaineessa saman molekyyliäärän hiilidioksidia sisältävä ilma vie pienemmän tilavuuden, molekyylit ovat siis tiheämmässä ja anturi tunnistaa enemmän molekyylejä (Vaisala, 2012). Vaisalan datankeruulaite tarvitseekin tiedon vallitsevasta ilmanpaineesta voidakseen laskea hiilidioksidipitoisuuden oikein. Anturiin ei ole sisäänrakennettu ilmanpainemittaria vaan se on mitattava erillisellä mittarilla ja syötettävä laitteeseen aina ennen käyttöä (Vaisala, 2013). Käytimme ilmanpaineen mittaamiseen mukana ollutta satelliittipaikanninta (GPSmap64s, Garmin Ltd., Lenexa, Yhdysvallat). Mallissa on ilmanpaineanturi korkeuserojen mittaamista varten, ja siihen voi myös valita ruudulle näkyviin vallitsevan ilmanpaineen.

GPS-paikantimen tarkkuudesta ilmanpainemittarina ei ollut juurikaan kokemusta tai tietoa, mutta tarkkuus oletettiin todennäköisimmin riittäväksi. Ilmanpaine olisi mahdollista tarkistaa myös lähimmältä sääasemalta, mutta tässä tapauksessa se olisi sijainnut liian kaukana ja eri korkeudella. Sääaseman käyttö onnistuu myös ainoastaan,



mikäli matkapuhelinverkkoa on sen verran että painelukema voidaan tarkistaa internetin kautta.

Haluttaessa mitata absoluuttisia hiilidioksidipitoisuuksia, saattaa Vaisalan oma ilmanpaineen korjaus tuottaa hieman huonompia tuloksia kuin mahdollisesti erikseen myöhemmin tehtävä korjaus (Pumpanen ym., 2010). Koska vallitseva ilmanpaine ei kuitenkaan ehdi muuttua kammionmittauksen aikana, jää vääristymä tällaisessa käytössä merkityksettömäksi kun ollaan kiinnostuneita CO<sub>2</sub>-pitoisuuden suhteellisista muutoksista (Pumpanen ym., 2010)

### PAR-säteilyn mittaaminen

PAR-säteilyn mittaamiseksi mukana oli kaksi kädessä pidettävää mittaria (MQ200, Apogee Instruments, Logan, Yhdysvallat). Anturissa on kaistanpäästösuodin, jonka läpäisee ainoastaan 400-700 nm aallonpituisen säteily. Mittarissa on kiinteän kaapelin päässä anturi, joka on asetettava tarkasti vaakasuoraan oikean lukeman saamiseksi. Anturi on asennettu alumiiniseen mittausalustaan, jossa on vesivaaka ja säätöruuvit tarkkaa kohdistusta varten.

Mittari on kevyt ja pieneen tilaan mahtuva. Se toimii myöskin yhdellä nappiparistolla varsin pitkän, ainakin viikon mittauksiin tarvittavan ajan. Mittarin asettelussa on oltava tarkkana ettei mikään varjosta sitä, eikä sen asento pääse muuttumaan liikuttaessa koealalla. Asensimme anturin aina ennen mittauksia maahan vaakatasoon, himmennettyjen mittausten yhteydessä anturi sijoitettiin himmennyskehikon alle. Kammion muovimateriaali ei merkittävästi itsessään himmennä, joten anturia ei tarvitse sijoittaa kammion sisälle (RW.ERROR - Unable to find reference:60)

Säteilyolosuhteet muuttuivat välillä nopeasti yhden mittauksenkin aikana pilvisyyden vaihtelun takia. Tällaisissa tapauksissa mittasimme säteilyn puolen minuutin välein ja laskimme siitä keskiarvon. Joissain tapauksissa pilvisyyttä voitiin myös hyödyntää tekemällä himmennetty mittausta pilven aikana ja täyden valaistuksen mittausta pilven taas siirryttyä toisaalle.

## Aineisto

Aineistoa kerättiin kaiken kaikkiaan 34 koealalta, joista kustakin mitattiin kahdelta kaulukselta. Kaulukset sijoitettiin edustamaan alalle keskimäärin tyypillistä kasvillisuutta, toinen pienempää (A-kaulus) ja toinen suurempaa (B-kaulus) määrää

biomassaa. Kutakin mittausta (valo-, himmennetty-, pimeä- ja maaperämittaus) tehtiin kolme rinnakkaismittausta. Mittaustiedostoja kertyi yhteensä 864 ja yksittäisiä hiilidioksidipitoisuuslukemia siten 8640.

## Ympäristömuuttujat

Ympäristömuuttujia on otettu mukaan mahdollisuuksien mukaan runsaasti hiilidioksidivuohon vaikuttavien tekijöiden arvioimiseksi, vaikkakin on tutkimustietoa siitä että hiilidioksidivuota on mahdollista mallintaa melko vähilläkin parametreilla (Shaver ym., 2013). Koealoilta kerättiin biomassanäytteet erikseen sammalista, jäkälästä, puuvartisesta sekä ruohovartisesta kasvillisuudesta. Karikekerros voi muodostaa 30 % maaperän hiilivuosta (Elberling ym., 2008), joten otimme erikseen karikenäytteen pimeässä tehdyn hiilivuomittauksen jälkeen. Näytteet kuljetettiin maastosta paperipusseissa Kevon tutkimusasemalle ja kuivattiin 60° C:ssa 48 tuntia, minkä jälkeen ne punnittiin tarkkuusvaaoilla. Ympäristömuuttujana käytettiin myös kokonaisbiomassaa. Putkilokasvien lajit peittoprosentteineen määritettiin kentällä.

Punnitusten yhteydessä osassa näytteistä todettiin mahdollisesti olevan mukana mineraaliainesta, mikä vääristää punnitustuloksia. Nämä näytteet kuljetettiin Helsinkiin missä niille tehtiin Geotieteiden ja maantieteen laitoksen laboratoriossa hehikutushäviöanalyysi. Tällaisia näytteitä oli pääasiassa karikenäytteiden joukossa. Aineistoa korjattiin tämän analyysin tulosten (liite 1.) perusteella.

Lämpötilat ovat hiilidioksidivuolle tärkeitä ympäristömuuttujia (Elberling ym., 2008; Fu ym., 2013; Oberbauer ym., 2007) ja niitä on tässä tutkimuksessa mukana useita: Ilman lämpötila, ilman keskilämpötila, lämpösumma, lämpötila kammion sisällä sekä maaperän lämpötila. Maaperän lämpötila mitattiin kolmesta kohdasta digitaalisella lämpömittarilla (TFX 392 SKW-T thermometer, Ebro Electronic; Ingolstadt, Saksa). Nämä kolme arvoa kirjoitettiin muistiin ja keskiarvo laskettiin myöhemmin. Kaikki käsin tehdyt muistiinpanot syötettiin taulukkolaskentaohjelmaan Kevon tutkimusasemalla kenttäjaksojen välipäivinä tai jälkikäteen.

Ilman lämpötilatiedot kesän ajalta saatiin tutkimusaloille etukäteen sijoitettujen lämpötilatallentimien (Thermo-Chron iButtons, San Jose, CA, Yhdysvallat) avulla. Tallentimet sijaitsivat varren päässä säteilyltä suojattuna n. 100 cm tutkimusalan keskipisteen yläpuolella, ja ne tallensivat lämpötilalukeman kahden tunnin välein. Näistä tiedoista laskin sekä keskilämpötilan että lämpösumman.



Lämpösumman (GDD3) laskin R-ohjelmistolla 3°C kynnysarvolla, eli otin mukaan päivät joiden keskilämpötila on ollut yli 3°C. Näiden päivien keskilämpötila summattuna yhteen muodostaa lämpösumman. Tämä arvo ei kuitenkaan kuvaa koko vuoden lämpösummaa, koska lämpötilatallentimet olivat maastossa ainoastaan 17.6.2015 - 18.8.2015.

Ilman lämpötila ja kosteus kammion sisällä mittauksen aikana tallentui hiilidioksidimittausten yhteydessä MI70-datankeruulaiteeseen samaan tiedostoon hiilidioksidilukemien kanssa. Maanperän kosteuden mittasimme kädessä pidettävällä mittarilla (FieldScout TDR 100; Spectrum Technologies, Plainfield, Inc., IL, Yhdysvallat) kolmesta kohdasta 7,5 cm syvyydeltä, ja aineistoon otettiin mukaan mittarin näistä automaattisesti laskema keskiarvo.

## Kaukokartoitusaineisto

NDVI (normalized difference vegetation index) perustuu siihen, että kasvillisuus heijastaa voimakkaasti lähi-infrapunasäteilyä mutta absorboi voimakkaasti näkyvää punaista valoa (Xie ym., 2008). NDVI lasketaan kaavalla (Rouse Jr. ym., 1974)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

jossa NIR on lähi-infrapuna ja RED on näkyvän valon punainen alue. NDVI:llä ja biomassalla on selkeä korrelaatio, joskaan ei lineaarinen (Jia ym., 2006; Riihimäki ym., 2017). Biomassa korreloi LAI:n (leaf area index) kanssa (Goswami ym., 2015) joka on fotosynteesin merkittävä ympäristömuuttuja (Lund ym., 2010; McDermitt ym., 1989; McFadden ym., 2003).

NDVI -aineisto on laskettu *Landsat 8:n OLI* -sensorilla 6.8.2015 otetusta kuvasta, johon USGS (United States Geological Survey) on tehnyt ilmakehäkorjauksen, tarkkuus on 30 metriä (USGS, 2015). Rgb -ilmakuva on koottu ja georeferoitu norjalaiselta *Permafrost* -sivustolta ladatuista ortoilmakuvista (Tsp Norway, 2015), tarkkuus on n. 1,45m. Mustavalkokuva on 0,5 m resoluution satelliittikuva *Worldview 1* ja 2 instrumenteista, joka on saatavana *ArcGis* -ohjelman taustakarttana (Esri, 2015).

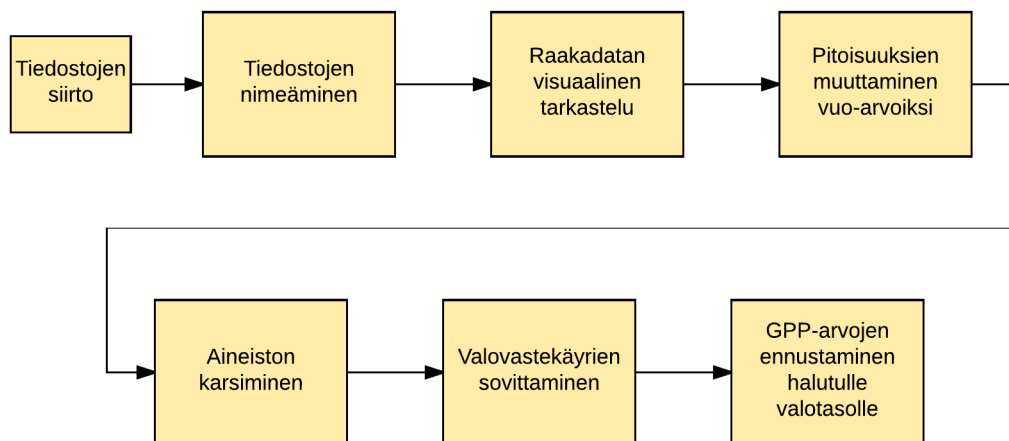
Lämpökanava on keskiarvo *Landsat 8 TIRS* -sensorin (100 m resoluutio) kanavista 10 ja 11 seitsemältä eri ajanhetkeltä kesinä 2013-2016 (USGS, 2015) kelvin-asteina. Lumen sulamispäivätieto on tuotettu GLM -mallilla vuosien 1984-2016 *Landsat TM 5*,

*ETM 7* ja *OLI 8* 30 metrin resoluutioisten kuvien pohjalta (Niittynen ja Luoto, 2017). Koealojen korkeustieto, säteilyn määrä ja kosteusindeksi on laskettu Norjan maanmittausviranomaisten korkeusmallista (Kartverket, 2017). Luin kaikki kaukokartoitusmuuttujat kullekin koealalle näistä aineistoista käyttäen *ArcGis* ohjelmiston *read multi values to points* -toimintoa (Esri, 2017)

## Aineiston analysointi

### Aineiston esikäsittely

Ennen kuin pääsin tekemään aineistolle varsinaisia analyysejä, oli aineistolle tehtävä useasta vaiheesta koostuva esikäsittely (kuva 14).



**Kuva 14.** Aineiston esikäsittelyn työvaiheet.

Ensimmäinen vaihe aineiston käsittelyssä oli tiedostojen nimeäminen mittauksien mukaan. Mittalaitteen tallentama tiedosto saa nimen automaattisesti mittausajankohdan mukaan, esimerkiksi *15.7.2015 10\_49.m70*. Kenttämuistiinpanoja hyväksi käyttäen nimesin jokaisen 864 tiedostosta kertomaan mistä mittauksesta on kyse, esimerkiksi *Saitti\_58\_kaulus\_b\_himm\_1\_15.7.2015.m70*. Jälkeenpäin ajatellen jokin universaali muoto voisi olla mielekkäämpi, esim. *58\_B\_dim1\_15.7.2015.m70*.

Alkuperäinen aika kannattaa jättää nimeen siltä varalta, että myöhemmin joutuu selvittämään mahdollisia epäselvyyksiä tiedostojen nimissä. Nimeämistyövaihe ei välttämättä vaadi erillisiä ohjelmistoja, mutta suurehko tiedostomäärä tekee

nimeämisestä työlästä ja altista virheille. *Bulk Rename Utility* -niminen Windows-ohjelma helpottikin nimeämisprosessia huomattavasti (Bulk rename utility, 2015).

Käsittelin aineiston R-ohjelmistolla (R Core Team, 2017). Mittalaitteen tallentamat tiedostot (\*.m70) voidaan lukea suoraan R-ohjelmistoon käyttäen sopivia asetuksia erottelumerkeille ja rivien hylkäämiselle (8 ensimmäistä riviä pois, kommenttimerkkinä #, NA-merkkinä - ). NA-merkin määrittely osoittautui tarpeelliseksi, kun huomasin että muutamissa tapauksissa mittaussarja ei ollut siirtynyt toimivana R-ohjelmistoon. Merkin määrittelyn jälkeen R-ohjelmisto ymmärsi, että sarjasta puuttui yksi arvo, jolloin se osasi tulkita sarjan muut arvot oikein.

Aineistosta on syytä poistaa kunkin mittauksen alusta ensimmäiset lukemat, koska kammion asettaminen paikalleen voi aiheuttaa paineen muutoksia ja siten vääristää tulosta ensimmäisen minuutin aikana (Davidson ym., 2002; Kulmala, 2015). Ensimmäistä mittaus tallennettiin 0 sekunnin kohdalla ja toinen 30 sekunnin kohdalla, karsin nämä kaksi pois analyysistä. Ensimmäinen käytössä oleva mittaus on siis tallennettu 60 sekunnin kohdalla kammion sulkemisesta.

Tarkastelin pitoisuusaineistoa tulostamalla kauluskohtaisia 12 yksittäistä mittausta käsittäviä kuvaajasarjoja, joita aineisto muodostaa yhteensä 72 kappaletta. Näistä on mahdollista arvioida alustavasti mittausten mielekkyyttä, ja tarkkailla puuttuuko aineistosta jotain.

Pitoisuuksien muuttaminen vuoarvoiksi

Yksittäiset hiilidioksidipitoisuuslukemat on muutettava vuoarvoiksi. Tähän työvaiheeseen sain neuvoja Liisa Kulmalalta (2015). Kammion pitoisuuksien muutokset muunnetaan hiilidioksidivoiksi ( $F$ ) aikayksikköä ( $t$ ) ja pinta-alayksikköä ( $A_c$ ) kohti yhtälöllä (Kulmala ym., 2010)

$$F = \frac{\Delta C_i(p, RH, O, T)}{\Delta t} \frac{M}{V_{mol}} \frac{V_c}{A_c}$$

missä  $\Delta C_i$  on muutos  $\text{CO}_2$ :n pitoisuudessa,  $\Delta t$  on mittaukseen käytetty aika,  $M$  on hiilidioksidin moolimassa (44,01 g mol<sup>-1</sup>),  $V_{mol}$  on moolitilavuus,  $V_c$  on kammion tilavuus, ja  $A_c$  on kammion pinta-ala. Pitoisuuden muutos ajan funktiona (kaavan osuus  $\Delta C/\Delta t$ ) on laskettu lineaarisella regressiolla käyttäen R-ohjelmiston lm-komentoa.

Hiilidioksidipitoisuus on riippuvainen paineesta ( $p$ ), suhteellisesta kosteudesta ( $RH$ ), ilman happipitoisuudesta ( $O$ ) ja lämpötilasta ( $T$ ). Nämä on otettu huomioon jo kentällä tiedonkeruulaitteessa. Kammion tilavuuteen on otettu huomioon myös kauluksen korkeus, joka voi vaihdella, mikäli kaulus on osittain upotettu maahan. Tein laskutoimitukset R-ohjelmistossa for-loopin avulla erikseen jokaisen kauluksen tiedostolle. Tuloksena muodostui 864 erillistä vuoarvoa, jotka kuvaavat NEE:tä mittaushetkellä. Positiivinen arvo tarkoittaa maaperästä ilmakehään vapautuvaa hiilidioksidia ja negatiivinen sitoutuvaa.

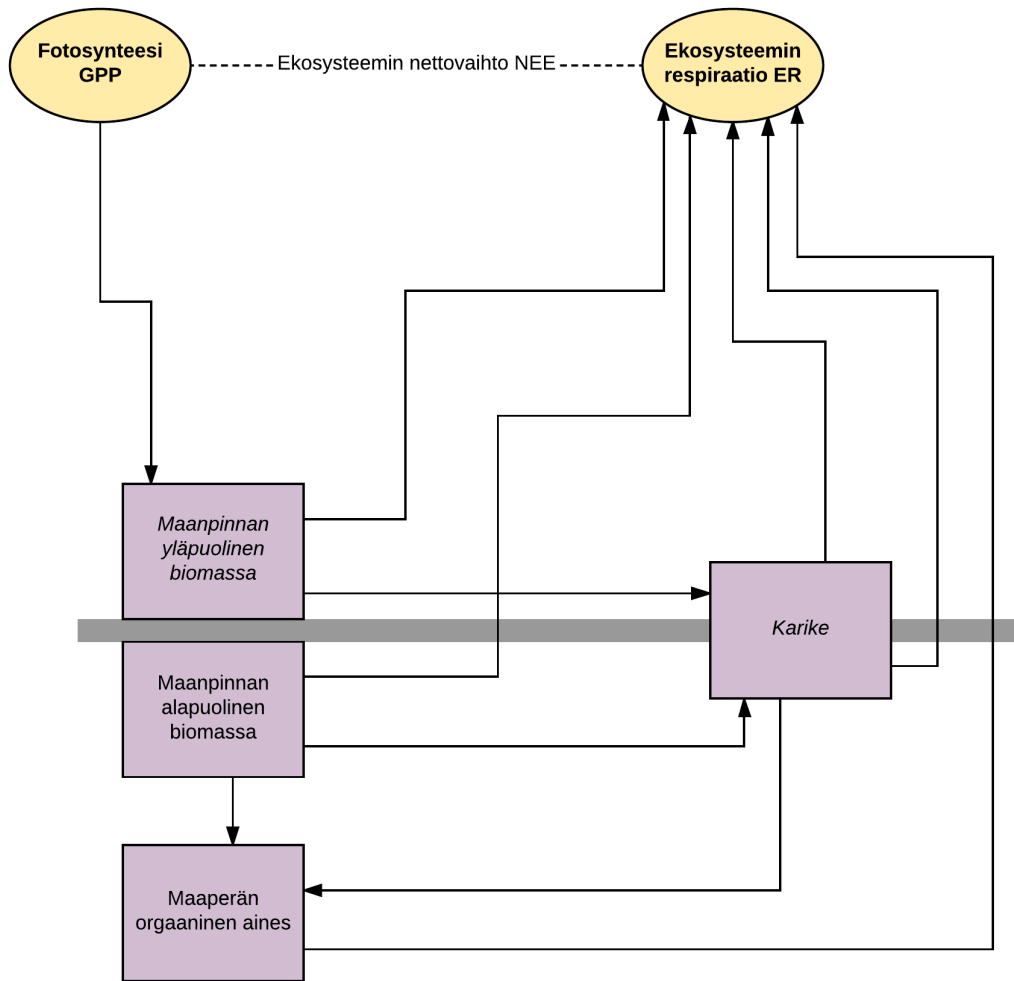
#### Vuoarvojen karsiminen

Vuoaineistosta oli karsittava yksittäisiä mittauksia valovastekäyrien sovittamisen onnistumiseksi sekä epäluotettavuuden vähentämiseksi. Tilastollisesti tein karsintaa eri pitoisuuksien mukaan piirretyn suoran selitysarvoa ja keskipoikkeamaa tutkimalla. Karsin mittauksia myös, mikäli lämpötila kammion sisällä oli noussut mittauksen aikana liikaa.

Selitysasteen perusteella pudotin mittauksen pois, jos vuo oli yli  $200 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$  ja selitysaste alle 0,9. Alle  $200 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$  vuot jätin tässä karsinnassa huomiotta, koska pienen vuon käyrä kulkee melko vaakatasossa ja siten sen selitysaste on pieni, vaikka se kuvaisikin hyvin todellisuutta (Rinne, 2016). Jätin mittauksen pois myös jos keskipoikkeama ylittää arvon  $5 \text{ ppm CO}_2$ . Lämpötilan karsintarajana pidin viidellä asteella mittauksen aikana noussutta lämpötilaa. Lisäksi jouduin karsimaan harkinnan perusteella, jos mittaus selvästi vaikutti virheelliseltä, kuten hiilidioksidin alkuarvon poiketessa oleellisesti odotetusta.

#### GPP-arvon ja respiraation laskeminen

Valoisassa mitatut vuoarvot kertovat mittaushetken NEE:n. Pimeässä mitatusta ER-arvosta vähennetään NEE, jolloin saadaan GPP. Tutkimuksessa oli myös alun perin tarkoitus erottaa maaperän respiraatio maan yläpuolisesta respiraatiosta vähentämällä pimeämittaus ja biomassanäytteenoton jälkeinen maaperämittaus toisistaan. Tämä menetelmä osoittautui kuitenkin epäluotettavaksi, koska sillä sain osalle respiraatioista negatiivisia arvoja. Tällöin respiraatio olisi sitonut hiilidioksidia, mitä ei todellisuudessa toki tapahdu.



**Kuva 15.** Yksinkertaistettu kaavio käsitteistä. Tässä tutkimuksessa respiraatiota käsitellään ainoastaan kokonaisuutena. Vertaa kuvaan 1. Nuoli kuvaa hiilen kulkusuuntaa. NEE (ekosysteemin hiilidioksidin nettovaihto, net ecosystem exchange) muodostuu GPP:n (bruttotuotanto, gross primary production) ja ER:n (ekosysteemin respiraatio, ecosystem respiration) erotuksesta. ER jakaantuu kasvillisuuden muodostamaan autotrofiseen respiraatioon sekä mikrobien hajotustoiminnan muodostamaan heterotrofiseen respiraatioon, mutta niitä ei eritellä tässä tutkimuksessa. NPP (nettotuotanto, net primary production) on GPP:n ja autotrofisen respiraation erotus, joten sitäkään ei määritellä tässä tutkimuksessa. Tutkimuksen vastemuuttujat on vahvennettu, selittävät muuttujat kursivoitu. (Jacobson, 2000; Kirschbaum ja Mueller, 2001) mukaan tekijän piirtämä.

Maaperämittauksen epäluotettavuuteen on todennäköisimmin syynä kasvillisuuden poiston aiheuttama häiriintyminen. Tällaiset mittaukset olisinkin syytä tehdä vasta seuraavana päivänä häiriintymisen aiheuttaman vääristymän minimoimiseksi (Illeris ym., 2004). Päätin yksinkertaistaa respiraatioiden tutkimista siten, että käsitelen respiraatiota ainoastaan kokonaisrespiraationa, ER (kuva 15. Vertaa kuvaan 1).

## Valovastekäyrien sovittaminen

Valovastekäyrä (Light response curve) on epälineaarinen malli, jolla kuvataan tuotannon (GPP) ja PAR-säteilyn välistä riippuvuutta (Tagesson, 2006). Sovitin kauluksien vuoarvoista valovastekäyrät joissa vuo on vastemuuttujana ja valotaso selittävänä muuttujana. Työvaihe osoittautui hieman haasteelliseksi, koska vaihtoehtoisia työtapoja on lukuisia eikä yksiselitteisesti standardoitua menetelmää ole.

Tällaisessa mallissa on otettava huomioon valovasteen saturoituva luonne, funktion on oltava erityisesti valovasteen sovittamiseen suunniteltu. Muutamien epäonnistuneiden kokeilujen jälkeen operaatio onnistui mm. Cahoonin (2012) käyttämällä funktiolla:

$$NEE = dk - \frac{A_{\max} \times PAR}{k + PAR},$$

missä NEE on ekosysteemin nettovaihto,  $dk$  on pimeärespiraatio,  $A_{\max}$  on suurin saavutettu tuotannon taso,  $k$  on puolet  $A_{\max}$  arvosta ja PAR on säteilytaso.

Tein mallit tämän funktion avulla R-ohjelmistossa käyttäen *nls*-komentoa (*nonlinear least squares*) (Soetaert ja Herman, 2009). Respiraation arvona yhtälössä käytin kolmesta pimeästä rinnakkaismittauksesta otettua mediaaniarvoa. Valitsin mediaaniarvon keskiarvon sijaan, koska tällöin mahdollisen yhden poikkeavan arvon vaikutus jää pois. Tulostin käyrät käyttäen R-ohjelmiston *FSA*-paketin (Ogle, 2017) *fitplot*-komentoa.

### GPP-arvojen ennustus

PAR-arvo  $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  on aiemmin käytetty taso ennustettaessa GPP-arvoja yhdelle PAR-säteilyn tasolle (Cahoon ym., 2012; Shaver ym., 2013; Street ym., 2007). Myös mitattujen valo-arvojen minimiä on aiemmin käytetty perusteena mallinnettavan valotason valinnalle (Cahoon ym., 2012), mutta se ei tullut kyseeseen tässä tutkimuksessa joidenkin koealojen varsin pieneksi jääneen suurimman valotason takia. Liian suurta arvoa ei myöskään kannata käyttää, koska ekstrapoloituilla PAR-arvoilla on taipumus yliarvioida suurinta yhteyttämistasoa (Shaver ym., 2007).

Ennustin myös yhden GPP-arvot valomittauksien keskimääräiselle valotasolle, tarkoituksena kartoittaa mittaushetken NEE:tä. Menetelmä ei ole välttämättä kovinkaan

mielekäs koska se kertoo vain yhdestä ajanhetkestä, mikä ei edes ole sama koealojen kesken. Halusin kuitenkin saada ympäristömuuttuihin vertailun lisäksi jonkinlaisen käsityksen keskimääräisestä NEE:stä tutkimusalueella mittauksien aikana.

Aineiston jakaminen *in situ* -aineistoon ja kaukokartoitusaineistoon

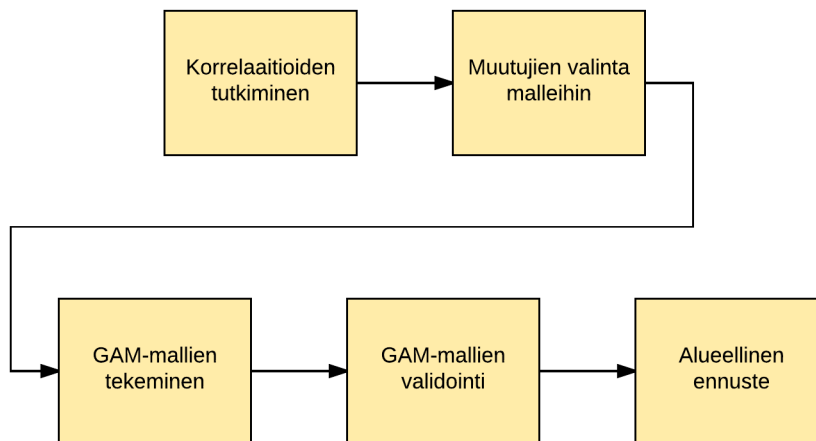
Jaoin aineiston kahteen osaan ennen analyysien tekoa. Toisena aineistona oli kauluskohtainen tieto, joka oli itse kerätty kentällä, jatkossa *in situ* -aineisto (N=57).

Kaukokartoituksella hankittua aineistoa ei voitu sitoa mittauskauluksen tarkkuudella aineistoon, vaan se täytyi sitoa koealaan kokonaisuudessaan. Kaukokartoitusaineiston sitominen kauluskohtaisiin mittauksiin vaatisi huomattavan tarkkaa resoluutiota aineistolta sekä tarkkoja differentiaalisella satelliittipaikannuksella mitattuja kaulusten sijainteja.

Toisen aineiston muodostikin koealakohtainen tieto, jossa otettiin keskiarvot A- ja B-kauluksista. Keskiarvot laskettiin painotettuina siten, että alueen kasvillisuutta paremmin edustavan kauluksen arvoa painotettiin enemmän. Painotuskertoimet (liite 3.) laskin arvioimalla hyödyntäen kentällä otettuja valokuvia sekä mustavalkoisia ilmakuvia ja rgb-satelliittikuvia.

Koska yhdestä kauluksesta ei voi ottaa koealaa edustavaan keskiarvoa, karsittiin tästä aineistosta kolme koealaa, joista oli käytössä ainoastaan yhden kauluksen tiedot. Keskiarvoja käytettiin vastemuuttujana kaukokartoitusaineiston (N=27) kanssa.

## Aineiston varsinainen analysointi



**Kuva 16.** Aineiston esikäsittelyn jälkeiset työvaiheet. Korrelaatioiden tarkastelun avulla valittiin muuttujia GAM-malleihin. Mallit validointiin *leave on out* -menetelmällä, ja malleilla tuotettiin alueelliset ennusteet tutkimusalueelle GPP:stä ja ER:stä.

### Korrelaatioiden tarkastelu

Analysointivaiheen työn kulku (kuva 16.) alkoi tutkimalla korrelaatioita vastemuuttujina toimivien tuotannon (GPP600) ja respiraation sekä ympäristömuuttujien välillä, erikseen *in situ* -aineistolla että *rs* -aineistolla. Korrelogrammit tein R-ohjelmiston *PerformanceAnalytics*-kirjastolla (Peterson ja Carl, 2014). Koska lämpötilamuuttujia on mukana useita, tutkin niiden keskinäisiä korrelaatioita erikseen.

### Yleistetyt additiiviset mallit

GAM-mallit (generalized additive models) ovat vastemuuttujan ja selittävien muuttujien suhdetta kuvaavia epälineaarisia malleja. Yksinkertaisemmista malleista poiketen niissä annetaan selittäjille vapausasteita, joiden mukaan malli tasoitusfunktion avulla sovittaa vastekäyrän aineistoon (Hastie ja Tibshirani, 1987). GAM-mallien avulla on mahdollista löytää joustavasti epälineaarisia riippuvuuksia, niissä aineiston luonne määrittelee riippuvuuden vastemuuttujan ja selittävän muuttujan välillä (Guisan ym., 2002; Hastie ja Tibshirani, 1987). Ei-parametrisinä niiden avulla on mahdollista



löytää myös saturoituvia riippuvuussuhteita (Hjort ja Luoto, 2011). Tein GAM -mallit R-ohjelmiston *mgcv* -paketin (Wood, 2011) avulla. Vapausasteiden annettiin malleissa vaihdella yhden ja kolmen välillä ( $k=3$ ). Valitsin muuttujat malleihin kokeilemalla eri muuttujia ja yhdistelmiä ja tarkkailemalla mallin selityssastetta ja muuttujien merkitsevyyttä p-arvoista.

### Muuttujien tärkeys malleissa

Tutkin muuttujien tärkeyttä malleissa sekoittamalla selittävien muuttujien arvoja sata kertaa yksi muuttuja kerrallaan ja vertaamalla sekoitetuilla muuttujilla tehtyjen mallien korrelaatioita varsinaisiin malleihin. Sadan malliajon korrelaatioiden keskiarvo on vähennetty luvusta yksi. Yhtä lähestyvä luku kuvaa siten muuttujan erittäin suurta tärkeyttä mallissa, nollaa lähestyvä luku taas kuvaa pientä tärkeyttä.

### Alueelliset ennusteet

Analysoinnin lopuksi laadin alueelliset ennusteet sekä GPP:lle että ER:lle tutkimusalueelle tekemieni mallien pohjalta. Tein ennusteen ainoastaan kaukokartoitusaineistolle, koska sille oli käytettävissä aineistoa mihin ennustus voidaan tehdä.

## Tulokset

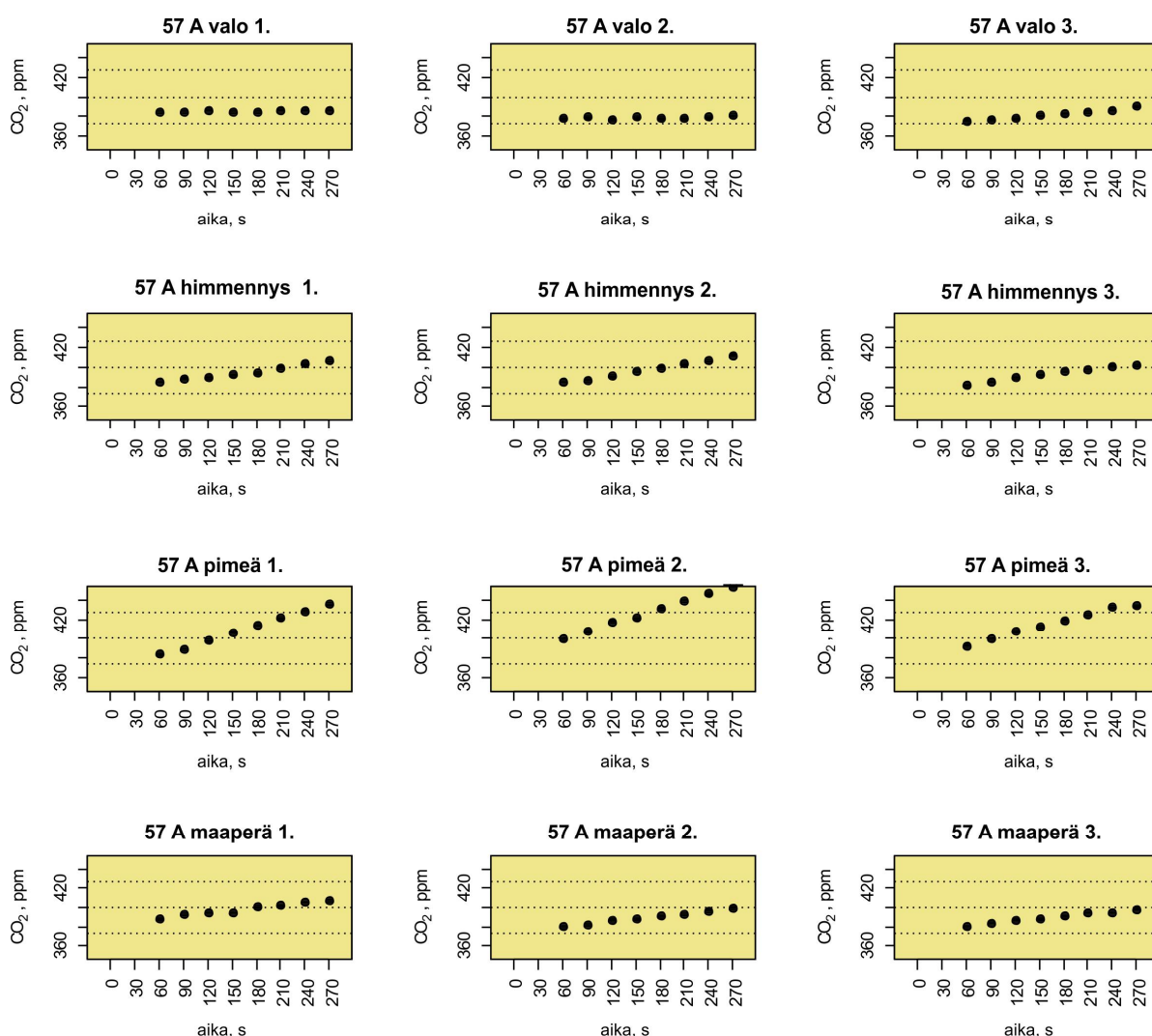
### Vuo-muuttujat

Tarkastelin pitoisuusarvodiagrammeista mittaustulosten mielekkyyttä visuaalisesti. Esimerkiksi koealan 57 (kuva 17) A-kauluksen aineistossa (kuva 18) valomittauksissa pitoisuuden muutos ei ole merkittävä. Pimeämittauksissa pitoisuus sen sijaan kasvaa.



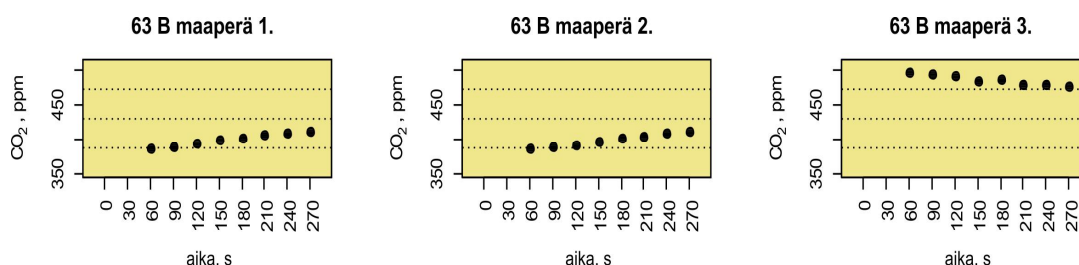
Kuva 17. Olosuhteet koealalla 57. Korkeus on 324 m m.p.y., viettosuunta on kaakkoon ja kasvillisuus on variksenmarjavoittoista (*Empetrum nigrum* ssp. *hermaphroditum*). Kuvassa näkyvän valkoisen säteilysuojan alla on lämpötilatallennin.

Kasvua on myös himmennetyssä ja maahengitysmittauksissa. Pimeämittauksen tulokseen on mukana vaikuttamassa sekä kasvillisuuden että maaperän respiraatio. Valomittauksen tuloksista voi päätellä, että fotosynteesin sitoma hiilidioksidimäärä kutakuinkin kompensoi molemmissa respiraatioissa vapautuneen hiilidioksidin. Ainoastaan aivan pieni pitoisuuden kasvu on havaittavissa. Rinnakkaiset mittaukset näyttävät melko yhteneviltä, vaikkakin pieniä poikkeamia on havaittavissa. Mittaus vaikuttaa mielekkäältä, tosin olisi voinut odottaa hiilidioksidipitoisuuden laskua valoisissa mittauksissa.



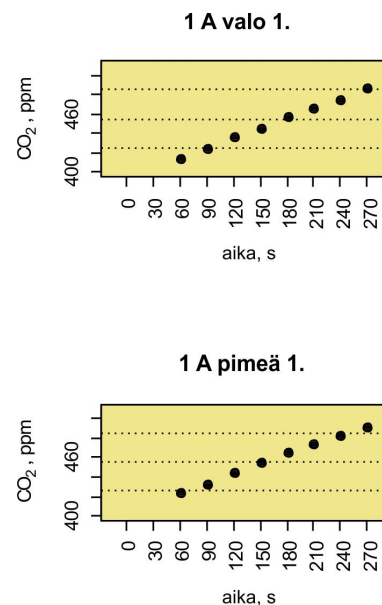
**Kuva 18.** Tutkimusalan 57 A-kauluksen mittaukset. Ylimmällä rivillä ovat valossa tehdyt mittaukset, seuraavalla rivillä himmennetyssä valossa tehdyt mittaukset, kolmannella rivillä pimeässä tehdyt mittaukset ja viimeisellä rivillä maaperämittaukset. Nouseva trendi tarkoittaa hiilidioksidipitoisuuden nousua mittauksen aikana. 0 ja 30 sekunnin kohdalta on arvot poistettu kammion sulkemisen jälkeen mahdollisesti ilmenevien vääristymien eliminoiniseksi.

Havaitsin aineiston tarkastelun yhteydessä myös ongelmia. Esimerkiksi mittauskauluksen 63B maaperämittausten kolmannessa rinnakkaismittauksessa on selvästi puutteita (kuva 19). Pitoisuus on mittauksen aloitushetkellä poikkeuksellisen suuri. Kammioon on saattanut päästä mittaajan uloshengitysilmaa kammion tuuletuksen yhteydessä. Kolmen rinnakkaisen mittauksen ansiosta yksi epäonnistunut mittaus jää pois käytöstä, koska kolmesta mittauksesta valittiin käyttöön mediaaniarvo.



**Kuva 19. Tutkimusalan 63 B-kauluksen maaperämittaukset. Kaksi ensimmäistä mittausta näyttävät oletetusti kasvavaa hiilidioksidipitoisuutta. Kolmannessa mittauksessa sen sijaan hiilidioksidin lähtötaso on poikkeuksellisen suuri ja se alkaa palata normaalia kohti mittauksen kuluessa. Kolmas mittaus on selvästi virheellinen.**

Ensimmäisenä kenttäpäivänä tehdyt (koealat 1. ja 13.) valo- ja pimeämittaukset näyttivät pitoisuusaineiston tarkastelussa varsin samanlaisilta, esim. koealan 1 A-kaulus (kuva 20). Kasvillisuus näillä koealoilla oli hyvin *Betula nana* -painotteista, jonka kasvutapa on erittäin maan myötäinen. Mittauskäytäntöjen vasta muotoutuessa ensimmäisenä kenttäpäivänä ei huomattu, että kauluksen asennus maahan katkaisi kauluksen alueelle jäävän kasvillisuuden maanmyötäiset varret ja osan juurista. Tämä vaikuttaa fotosynteesiin, ja ainoa näkyvä ilmiö mittauksissa onkin valotasosta riippumaton respiraatio. Tällä perusteella hylkäsin ensimmäisenä kenttäpäivänä mitatut kaksi koealaa.



**Kuva 20. Tutkimusalan 1 A-kauluksen kaksi mittausta, joissa on saatu saman suuntaisia arvoja. Valoisassa tehdyssä mittauksessa pitäisi kuitenkin näkyä fotosynteesin vaikutus ja arvojen pitäisi olla pienempiä kuin pimeämittauksissa.**

## Esimerkki vuoarvoiksi muutetun aineiston tarkastelusta

Tarkastellaan esimerkiksi kauluksen 57A aineistoa (taulukko 1.) Samassa valotasossa tehtyjen mittausten pitäisi tuottaa jokseenkin saman suuruisia vuo-lukemia. Hajontaa esiintyy jonkin verran, mutta suuruusluokat ovat kuitenkin samoja. Positiivinen vuoarvo tarkoittaa maaperästä vapautuvaa hiilidioksidia ja negatiivinen sitoutuvaa.

Taulukko 1. Kauluksen 57A aineisto muutettuna vuoarvoiksi mittauksista valoisassa, himmennettynä, pimeässä sekä kasvillisuuden poistoin jälkeen.

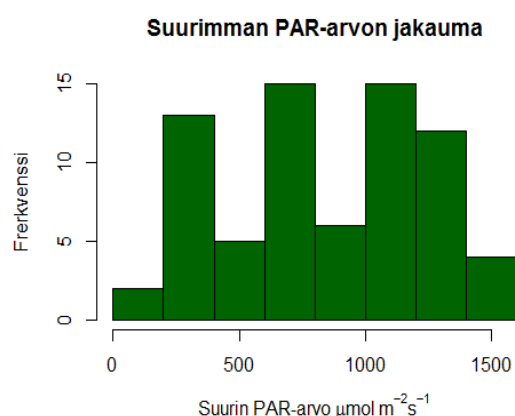
| 57A     | par $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ | vuo $\text{mg Co}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-2}$ |
|---------|--|--|
| valo 1  | 690                                      | 20   |
| valo 2  | 800                                      | 22   |
| valo 3  | 800                                      | 109  |
| himm 1  | 300                                      | 201  |
| himm 2  | 230                                      | 250  |
| himm 3  | 250                                      | 211  |
| pimeä 1 | 0  | 478  |
| pimeä 2 | 0  | 534  |
| pimeä 3 | 0  | 444  |
| maap 1  | 0  | 184  |
| maap 2  | 0  | 149  |
| maap 3  | 0  | 136  |

### Vuoarvojen karsinta

Keskipoikkeaman perusteella karsin mittauksia eli yksittäisten pitoisuusarvojen määrää 849:stä 808:aan. Lämpötilan nousun takia karsin mittauksia 808:sta 780:een. Lisäksi kolme mittausta karsin käsin koska niissä oli selvästi havaittavissa virheellinen hiilidioksidipitoisuuden alkuarvo. Yksi piste piti karsia myös, koska kymmenestä hiilidioksidipitoisuusarvosta oli tallentunut ainoastaan kolme.

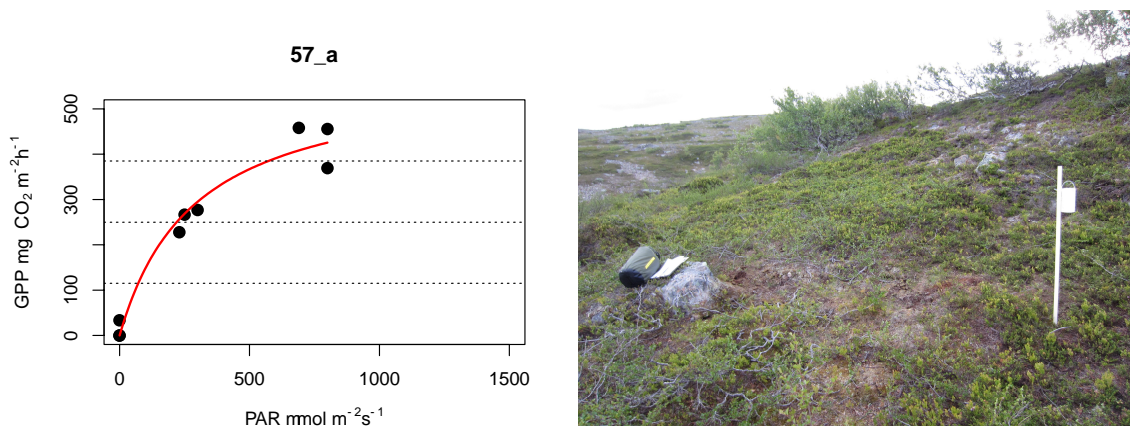
### Valovastekäyrät

Valovastekäyrien sovittamisessa käytettävissä ollut suurin PAR -säteilyn taso vaihteli huomattavasti, välillä 300 - 1540  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (kuva 21). Optimioloissa kaikista mittauksista olisi hyvä olla käytössä korkeampia PAR -arvoja, mutta sääolosuhteet rajoittavat voimakkaasti mahdollisuutta korkeampiin arvoihin.



Kuva 21. Korkeimpien PAR -arvojen jakauma

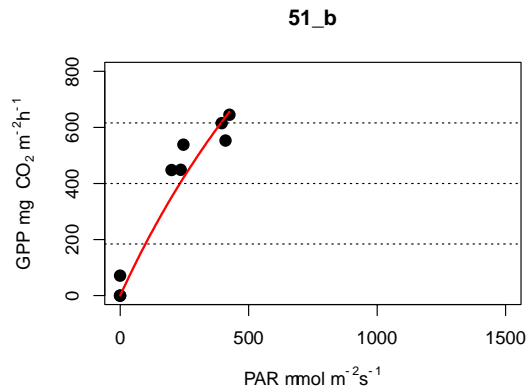
Valovastekäyriä sain sovitettua lopulta siten että N-määräksi muodostui yhteensä 57 mittauskaulusta 30 eri koealalta. Katsotaan esimerkkinä tyypillistä hyvin onnistunutta valovastekäyriä kaulukselta 57 A (kuva 22.) Siitä nähdään, että PAR-säteilyn ja GPP:n suhde on saturoituva. Vasteen epälineaarisuudesta voidaan päätellä, että tietyn pisteen jälkeen tuotanto ei enää merkittävästi kasvaisi, vaikka valon määrä vielä lisääntyisikin.



**Kuva 22.** Vasemmalla on koealan 57 A-kauluksen PAR -säteilyn ja GPP:n suhdetta kuvaava valovastekäyrä, joka on sovitettu Cahoonin (2012) funktiolla. Käyräviivaisesta vasteesta voidaan päätellä, että valaistuksen voimakas lisääminen ei enää lisäisi merkittävästi GPP:n määrää. Käyrän avulla voidaan ennustaa GPP:n määrä PAR -arvolle  $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Oikealla on kuva koealalta, kasvillisuus koostui pääosin variksenmarjasta (*Empetrum nigrum ssp. hermaphroditum*). Kaakkoisrinne, korkeus 324 m m.p.y.

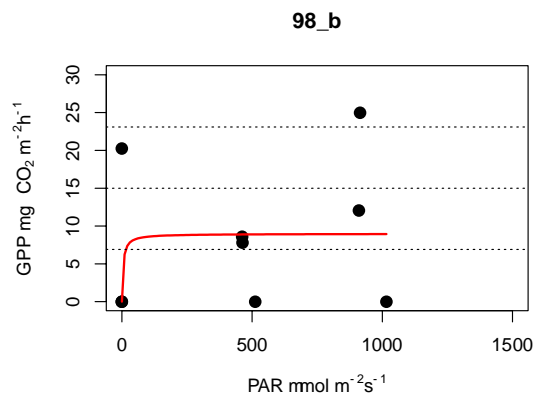
Toisenlaisessa esimerkissä koealalta 51 (kuva 23.) nähdään kuvaaja, joka on lähes lineaarinen. Aineiston avulla muodostettu käyrä kuvaa ainoastaan alkuosaa valovastekäyrästä verrattuna tilanteeseen, missä valoa olisi ollut käytettävissä reilusti enemmän. Tällaisen käyrän avulla on vaikea arvioida tuotannon määrää esim. yli  $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  säteilyolosuhteissa, koska ei voida tietää missä vaiheessa käyrä alkaa saturoitua. Tässä tutkimuksessa käytetty  $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  on kuitenkin käyrästä paremmin ennustettavissa





**Kuva 23.** Vasemmalla on koealan 51 B -kauluksen PAR -säteilyn ja GPP:n suhdetta kuvaava valovastekäyrä, joka on sovitettu Cahoonin (2012) funktiolla. Vasteen lineaarisesta luonteesta voidaan päätellä, että GPP kasvaisi vielä mikäli valaistusta olisi runsaammin. Oikealla kuva koealalta, alueella oli huomattavasti vaivaiskoivua (*Betula nana*). Etelärinne, korkeus 365 m m.p.y.

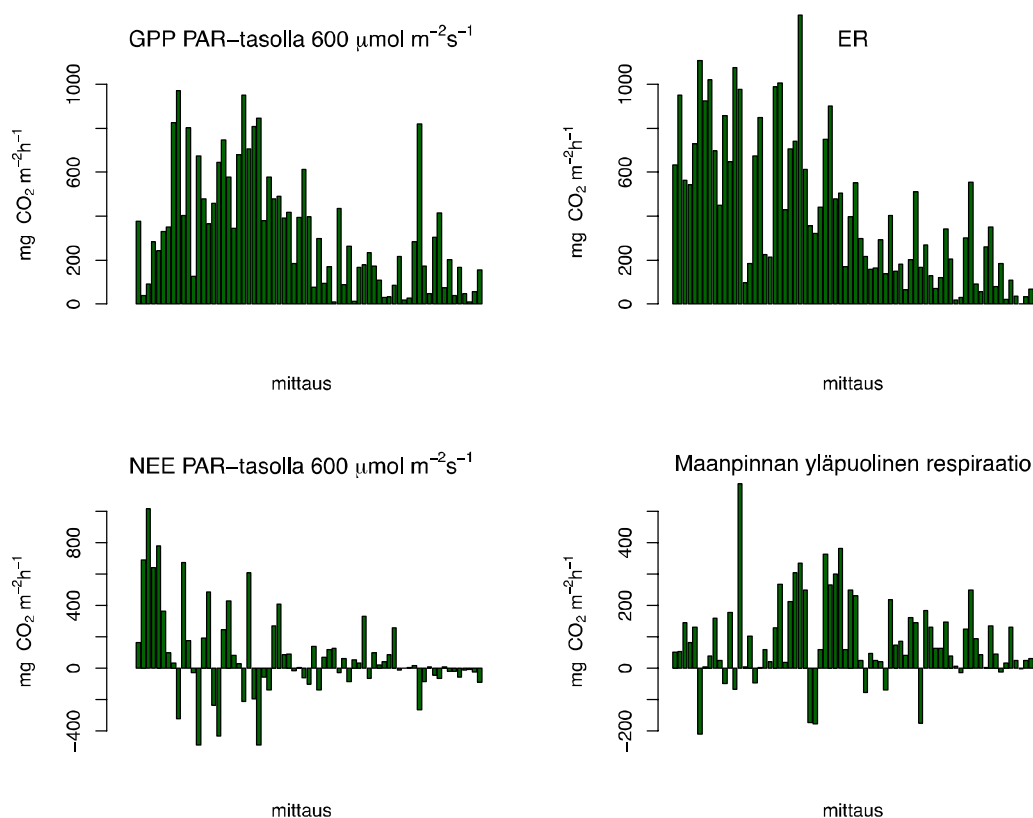
Kuvassa 24. on esimerkki ongelmallisesta tapauksesta, missä tuotanto pysyy varsin matalana pienen biomassan takia runsaasta valaistuksesta huolimatta. Pisteiden sijoittumisesta koordinaatistoon nähdään myös, että pienillä voilla esiintyy tuloksissa suhteellisesti huomattavasti enemmän hajontaa. Funktio ei pysty kovin hyvin seuraamaan hajanaisia pisteitä, mutta PAR 500  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ :n tietämillä on kaksi pistettä, joten PAR 600  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ :n kohdalle ennustetun vuon voidaan olettaa edustavan koealan GPP:tä kohtuullisesti.



**Kuva 24.** Vasemmalla on koealan 92 B -kauluksen PAR -säteilyn ja GPP:n suhdetta kuvaava valovastekäyrä, joka on sovitettu Cahoonin(2012) funktiolla. Alueella on vain vähän kasvillisuutta, joten tuotanto ei ole kasvanut paljoakaan nollan yläpuolelle, vaikka valaistusolosuhteet ovat olleet hyvät. Mittauksissa on myös hajontaa näin pienillä vuotasoilla. Huomaa y-akselin asteikko. Oikealla kuva koealalta, koillisrinne, korkeus 704m m.p.y.

## NEE, ER ja ennustetut GPP-arvot

NEE vaihteli välillä  $-275 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$  ja  $853 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ . NEE:n keskiarvo oli  $60 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ .  $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  säteilytasolle ennustetut GPP -arvot vaihtelevat välillä  $9 - 970 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$  (kuva 25). Jatkossa tätä muuttujaa kutsutaan termillä GPP600. Ekosysteemin respiraatiot vaihtelivat välillä  $2 - 1315 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ . Kuvasta näkee myös maanpäällisen respiraation vaihtelun, mikä negatiivisine arvoineen osoitti maaperän vuomittaukset epäluotettaviksi.



**Kuva 25.** GPP-600 arvon vaihtelu, ER:n vaihtelu, NEE:n vaihtelu säteilytasolla  $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , ja maanpinnan yläpuolisen respiraation vaihtelu. Huomaa maanpinnan yläpuolisen respiraation negatiiviset arvot, niitä ei pitäisi esiintyä luotettavassa aineistossa. Jokainen palkki kuvaa yhden mittauskauluksen arvoa.

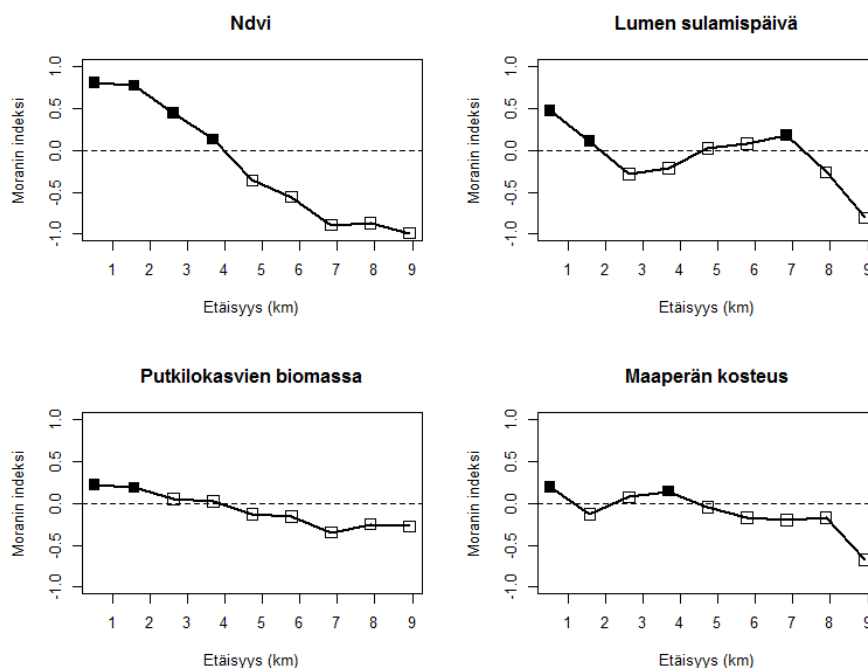
Valomittausten keskimääräinen valotasoli  $770 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Tälle valotasolle ennustetut GPP -arvot vaihtelivat välillä  $9 - 1081 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ , keskiarvon ollessa  $317,5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ . Kun nämä arvot vähennetään respiraation arvosta, saadaan mittausajankohdan NEE, joka puolestaan vaihtelee välillä  $-646$  ja  $643 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ . Tästä tulee kaikkien koealojen NEE:n mediaaniarvoksi  $-3,5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$ .



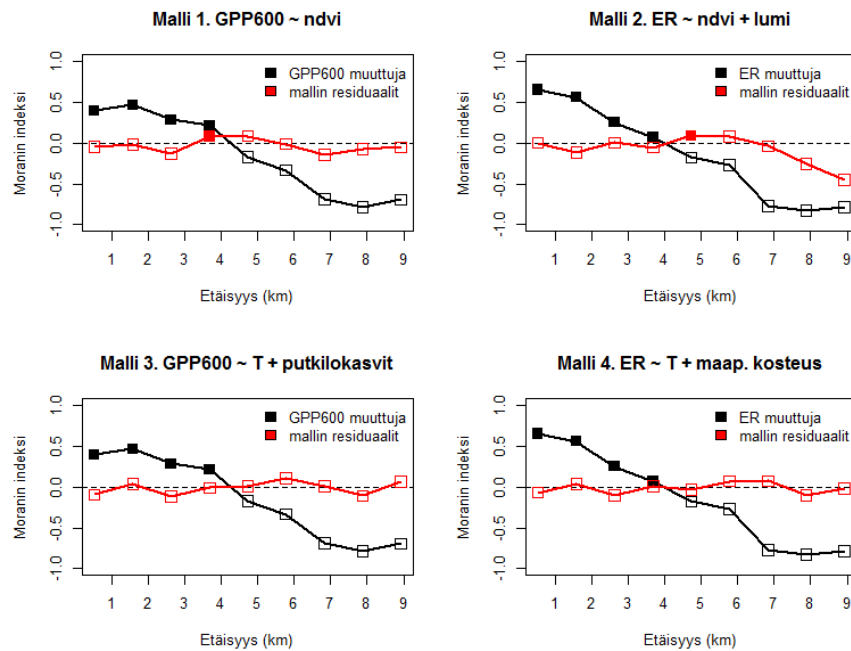
## Spatiaalinen autokorrelaatio

Laskin spatiaalisen autokorrelaation selittäville muuttujille, vastemuuttujille sekä mallien residuaaleille R-ohjelman *pgirmes*-paketin (Giraudoux, 2017) *correlog*-komennon avulla. Malleissa käytettyjen selittävien muuttujien Moranin indeksi (kuva 26.) on kaikilla muuttujilla merkitsevä lähietäisyydellä. Indeksillä laskee etäisyyden funktiona, mutta lumen sulamispäivän ja maaperän kosteuden osalta nousee vielä uudelleen. Indeksien suuruus on kuitenkin 0,5 tai alle kaikilta muilta kohdista paitsi NDVI:llä alle kahden kilometrin etäisyydellä.

Vastemuuttujat (kuva 27.) ovat spatiaalisesti autokorreloituneita neljän kilometrin etäisyydelle saakka, tosin Moranin indeksi laskee etäisyyden kasvaessa. NDVI:n spatiaalista autokorrelaatiota voi pitää melko voimakkaana ensimmäisten kilometrien osalta. Mallien residuaalit sen sijaan eivät saa merkitseviä arvoja Moranin indeksistä, pl. malli 1 neljän kilometrin kohdalla ja malli 2. viiden kilometrin kohdalla. Niissäkin arvo on varsin pieni.



**Kuva 26.** Selittävien muuttujien spatiaalinen autokorrelaatio Moranin indekseinä etäisyyden funktiona. Täytetyn ruudun kohdalla spatiaalinen autokorrelaation on merkitsevää ( $p \leq 0,05$ ). NDVI:n spatiaalista autokorrelaatiota voidaan pitää voimakkaana ensimmäisten kilometrien osalta.



**Kuva 27.** Vastemuuttujien sekä mallien residuaalien spatiaalinen autokorrelaatio Moranin indekseinä etäisyyden funktiona. Täytetyn ruudun kohdalla spatiaalinen autokorrelaatio on merkitsevää ( $p \leq 0,05$ ). Molempien vastemuuttujien Moranin indeksi on merkitsevä neljään kilometriin asti. Mallien residuaaleilla ei kuitenkaan ole merkitsevää spatiaalista autokorrelaatiota, poislukien erittäin pienellä arvolla mallilla 1. 4 km kohdalla ja mallilla 2. 5 km kohdalla.

## Ympäristömuuttujat

Ympäristömuuttujien sekä vastemuuttujien keskeiset tunnusluvut ovat taulukossa 3. Mahdollisimman laaja vaihteluväli on hyvä kaikissa muuttujissa, paitsi maksimivalotaso saisi olla kaikissa mittauksissa korkea.

**Taulukko 3. Ympäristömuuttujien (pl. lämpötilamuuttujat) sekä vastemuuttujien keskeiset tunnusluvut.**

Range = vaihteluväli, min = pienin havainto, max = suurin havainto, mean = keskiarvo, median = mediaaniarvo, sd = keskiarvo, Ele = korkeus m.p.y., maxpar = korkein PAR -arvo, humus = humuskerroksen paksuus, twi = topografinen kosteusindeksi, rad = viettosuunta, soilmoist = maapeärn kosteus, vasc= putkilokasvien biomassa, grass = ruohovartisten kasvien biomassa, moss = sammalten biomassa, lich = jäkälien biomassa, litter = karikkeen massa, biomass = kokonaisbiomassa.

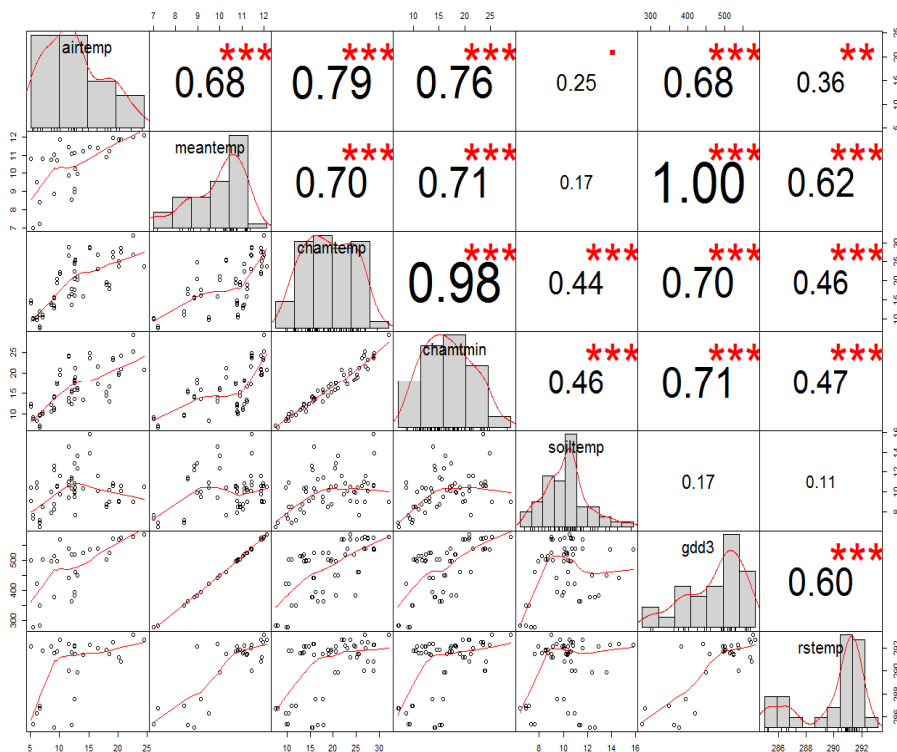
### Lämpötilamuuttujat

Lämpötilamuuttujien keskeiset tunnusluvut ovat taulukossa 4. Koska erilaisia lämpötilamuuttujia oli mukana useita, tutkin niiden keskinäisiä korrelaatioita erikseen (kuva 28). Suurin osa lämpötilamuuttujista korreloi erittäin voimakkaasti keskenään. Ainoastaan maaperän lämpötilalla ei ollut kaikkien muuttujien kanssa selkeää korrelaatiota. Varsinaiseen tarkasteluun valitsin lämpötilamuuttujista ilman lämpötilan keskiarvon sekä maaperän lämpötilan.

|           | n  | range | min  | max   | mean  | median | sd    | yksikkö  |
|-----------|----|-------|------|-------|-------|--------|-------|--|
| GPP600    | 57 | 961   | 9    | 970   | 303   | 234    | 248   | mg Co <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-2</sup> |
| ER        | 57 | 1313  | 2    | 1315  | 374   | 270    | 326   | mg Co <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-2</sup> |
| NDVI      | 57 | 0,71  | 0,12 | 0,83  | 0,53  | 0,57   | 0,21  |  |
| ELE       | 57 | 852   | 152  | 1004  | 473   | 421    | 220   | m  |
| MAXPAR    | 57 | 1240  | 300  | 1540  | 931   | 972    | 365   | μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>               |
| HUMUS     | 57 | 27    | 0    | 27    | 6     | 4      | 5     | cm   |
| SNOW      | 57 | 68    | 129  | 197   | 153   | 152    | 12    | d.o.y.   |
| TWI       | 57 | 8,16  | 7,12 | 15,28 | 9,78  | 9,76   | 1,57  |  |
| RAD       | 57 | 0,36  | 0,22 | 0,58  | 0,4   | 0,39   | 0,08  | MJ cm <sup>-2</sup> kk <sup>-1</sup>               |
| SOILMOIST | 57 | 64,7  | 1    | 65,7  | 13,2  | 9,5    | 11,3  | %  |
| VASC      | 57 | 43,8  | 0    | 43,8  | 10,9  | 8      | 11,2  | g  |
| GRASS     | 57 | 3,6   | 0    | 3,6   | 0,3   | 0,1    | 0,6   | g  |
| MOSS      | 57 | 27,1  | 0    | 27,1  | 1,0   | 0      | 3,7   | g  |
| LICH      | 57 | 7,2   | 0,0  | 7,2   | 0,6   | 0,2    | 1,2   | g  |
| LITTER    | 57 | 30,8  | 0,0  | 30,8  | 8,3   | 4,5    | 8,3   | g  |
| BIOMASS   | 57 | 43,9  | 0,08 | 43,9  | 12,82 | 10,3   | 10,95 | g  |

**Taulukko 4. Lämpötilamuuttujien keskeiset tunnusluvut. Lämpötilat ovat °C, pl. rtemp on °K. Range = vaihteluväli, min = pienin havainto, max = suurin havainto, mean = keskiarvo, median = mediaaniarvo, sd = keskiarvo.**

|          | n  | range | min | max   | mean  | median | sd   |
|----------|----|-------|-----|-------|-------|--------|------|
| airtemp  | 57 | 24,6  | 5,1 | 24,6  | 12,6  | 12,1   | 5,1  |
| meantemp | 57 | 12,1  | 7   | 12,1  | 10,4  | 10,8   | 1,4  |
| chamtemp | 57 | 32    | 7,6 | 32    | 19,1  | 19     | 6,4  |
| chamtmin | 57 | 29,1  | 6,9 | 29,1  | 16,1  | 15,8   | 5,3  |
| soiltemp | 57 | 15,8  | 6,4 | 15,8  | 10,1  | 10,1   | 1,9  |
| gdd3     | 57 | 584   | 276 | 584   | 474,9 | 501    | 86,6 |
| rtemp    | 57 | 293,1 | 285 | 293,1 | 290,4 | 291,5  | 2,6  |

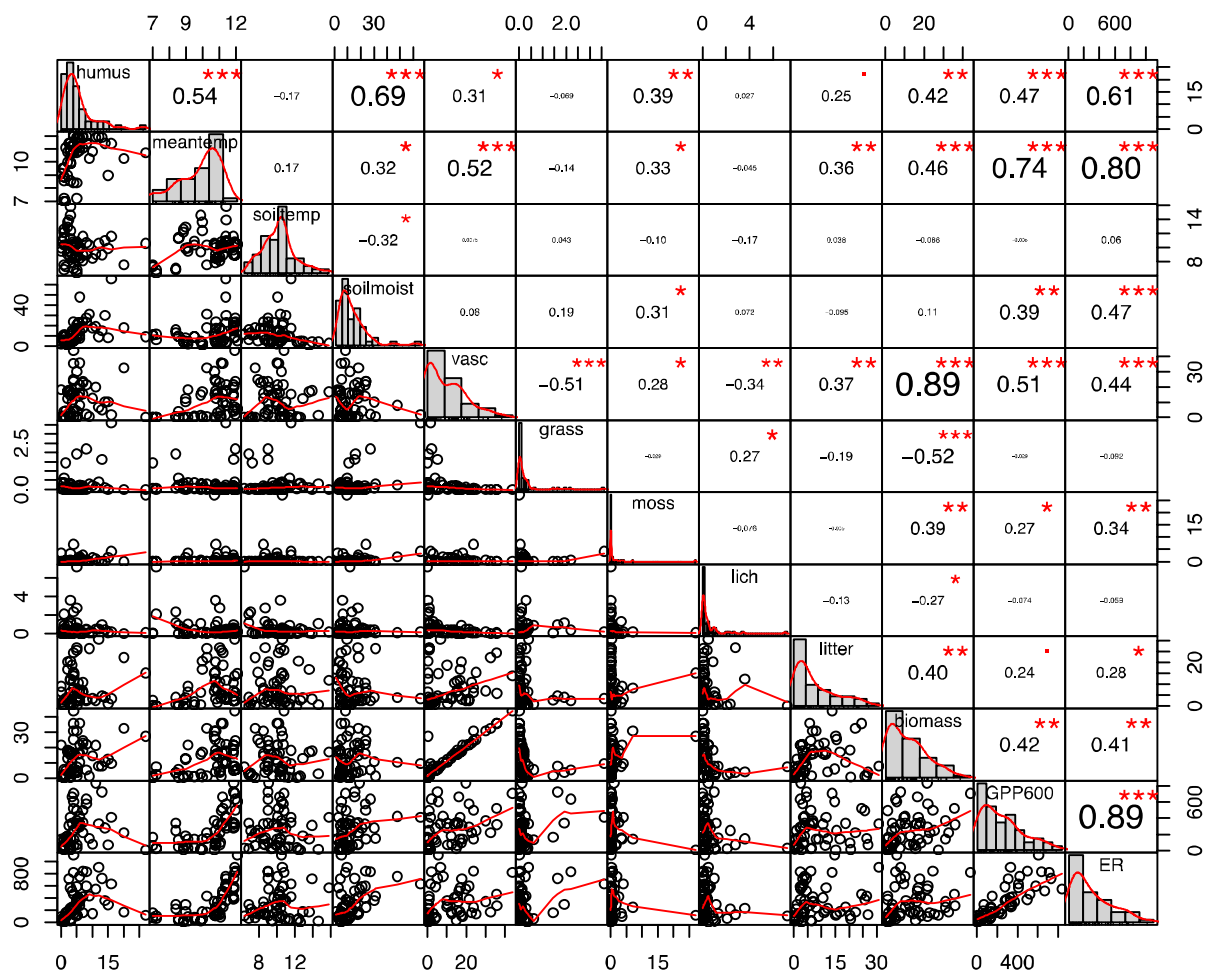


Kuva 28. Eri lämpötilamuuttujien keskinäiset korrelaatiot (Spearman) sekä histogrammit.

Lämpötilamuuttujat korreloivat voimakkaasti keskenään, paitsi maaperän lämpötila joka korreloi selkeästi vain kammion sisältä mitatun lämpötilan kanssa. Airtemp = ilman lämpötila mittausaikana, meantemp = ilman keskilämpötila, chamtemp = keskiarvo kammion sisälämpötilasta, chamtmin = pienin kammion sisälämpötila, soiltemp = maaperän lämpötila, gdd3 = lämpösumma 3 °C kynnsarvolla, rstemp = Landsat lämpökanava.

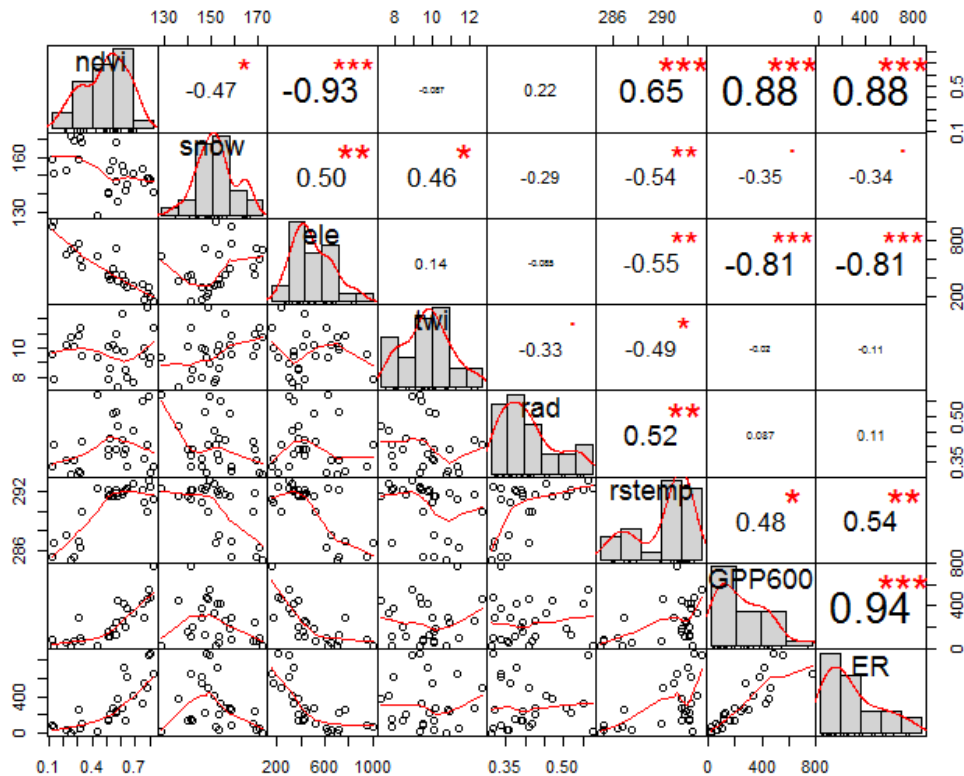
## In situ -aineisto

In situ -aineistossa (kuva 29) huomattavin korrelaatioita GPP:lle on ilman keskilämpötilalla (0,71). Muita korrelaatioita GPP:lle on havaittavissa humuksen paksuudella, maaperän kosteudella sekä putkilokasvien- ja kokonaisbiomassalla. Myös ER:n keskilämpötilalla on huomattavan suuri korrelaatio (0,80). Muita korrelaatioita ER:n kanssa on havaittavissa samoin humuksen paksuudella, maaperän kosteudella, ja biomassilla. Myös vastemuuttujilla on keskenään erittäin voimakas korrelaatio (0,89).



**Kuva 29.** Tuotannon (GPP600), ekosysteemin respiraation (ER) ja tutkimuksessa mitattujen ympäristömuuttujien väliset korrelaatiot sekä histogrammit in situ -aineistolle (Spearman). Humus = humuskerroksen paksuus, meantemp = ilman keskilämpötila, soiltemp = maaperän lämpötila, soilmoist = maaperän kosteus, vasc = putkilokasvien biomassa, grass = ruohovartisten kasvien biomassa, moss = sammalten biomassa, lich = jäkälien biomassa, litter = karikkeen massa, biomass = yhteenlaskettu biomassa, ele = korkeus, rtemp = kaukokartoituslämpötila.

Kuvasta voidaan tutkia myös muuttujien välisiä korrelaatiota multikollineaarisuuden arvioimiseksi. Huomattava korrelaatio on kokonaisbiomassan ja putkilokasvien biomassan välillä (0,90). Tästä voidaan päätellä, että kokonaisbiomassa muodostuu pääosin putkilokasveista. Maaperän kosteudella ja humuskerroksen paksuudella on myös keskenään selkeä korrelaatio (0,69). Myös vastemuuttujilla GPP ja ER on selkeä keskinäinen korrelaatio (0,89)



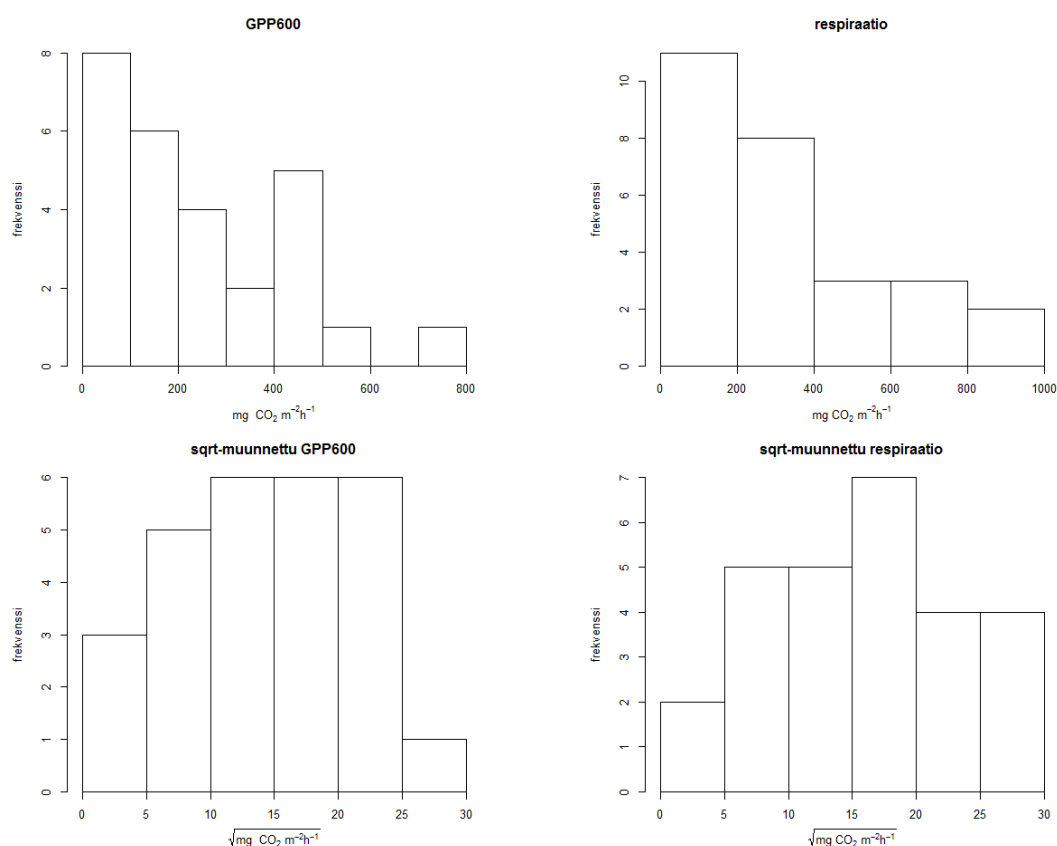
Kuva 30. Tuotannon (GPP600), ekosysteemin respiraation (ER) ja kaukokartoituksella hankittujen ympäristömuuttujien väliset korrelaatiot sekä histogrammit (Spearman). NDVI = kasvillisuusindeksi, snow = lumen sulamispäivä, ele = korkeus merenpinnasta, twi = topographic wetness index, rad = viettosuunta, rtemp = kaukokartoituslämpötila. NDVI:llä ja korkeudella on erittäin selkeä korrelaatio vastemuuttujien kanssa, mutta myöskin erittäin vahva keskinäinen korrelaatio.

### Kaukokartoitusaineisto

Kaukokartoitusaineistossa (kuva 30.) huomattava korrelaatio on NDVI:llä (0,88) respiraation sekä tuotannon kanssa. Korkeus korreloi myös voimakkaasti sekä NDVI:n että vastemuuttujien kanssa, ja kaukokartoituslämpötilalla on havaittava korrelaatio vastemuuttujiin. Lumen sulamisajankohdan korrelaatio vastemuuttujien kanssa oli pienehkö mutta havaittava. Myös kaukokartoitusaineistossa on vastemuuttujien GPP ja ER välillä huomattavan suuri keskinäinen korrelaatio (0,94). Ympäristömuuttujien välistä multikollineaarisuutta on kaukokartoituslämpötilalla kaikkien muuttujien kanssa, korkeudella NDVI:n ja lumen sulamisajankohdan kanssa sekä kosteusindeksillä lumen sulamisajankohdan kanssa.

## Yleistetyt additiiviset mallit

Molemmista aineistoista tehtiin GAM-mallit sekä tuotannolle että respiraatiolle, yhteensä siis neljä mallia. Valitsin malleihin mukaan otettavia muuttujia korrelaatioita tutkimalla, sekä kokeilemalla malleihin eri muuttujia. Lopulliset muuttujat valitsin tutkimalla muuttujien merkitsevyyttä ja mallin selitysastetta. Ennen mallien tekemistä tein vaste-aineistoille neliöjuurimuunnoksen aineistojen muuntamiseksi lähelle normaalijakaumaa (kuva 31).

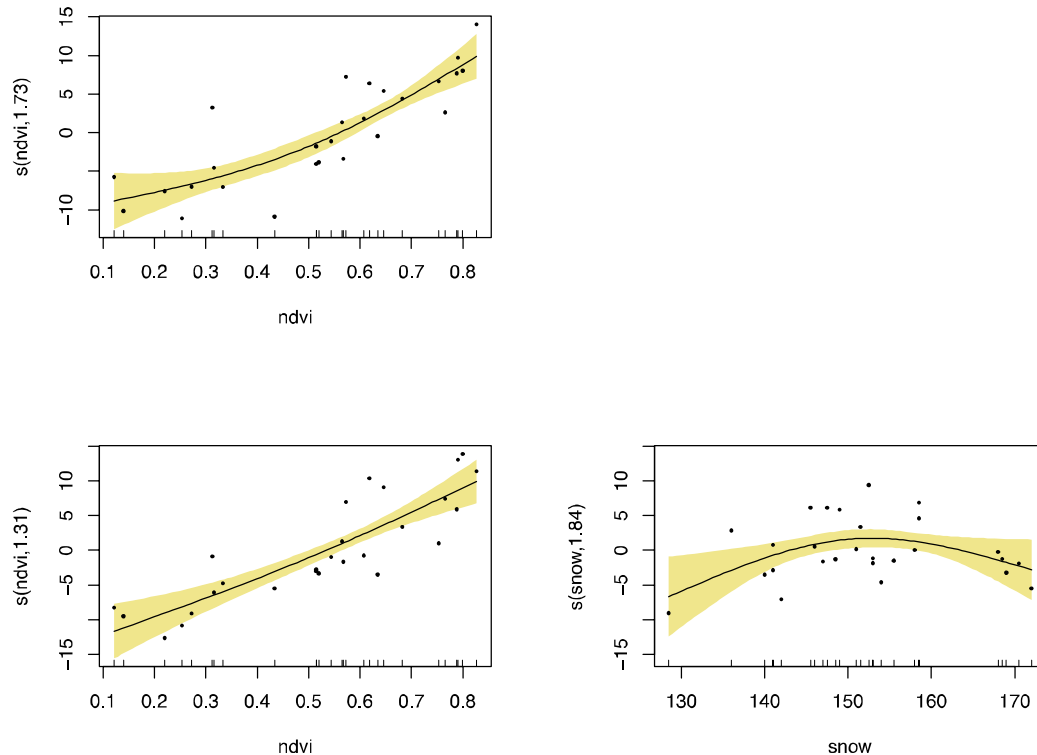


Kuva 31. Vasteaineistojen jakauma ennen ja jälkeen neliöjuurimuunnosta.

## GAM-mallit, kaukokartoitusaineisto

Kaukokartoitusaineiston (N=27) GAM -mallissa NDVI selittää 73,2 % tuotannon määrästä (malli 1, kuva 30). Mikään muu muuttuja ei ollut merkitsevä. Kokeilin myös jättää NDVI:n kokonaan pois ja käyttää muita muuttujia, mutta selitysasteet jäivät

tällöin varsin pieniksi. Respiraation määrästä NDVI ja lumen sulamispäivä selittävät 79,2 % (malli 2, kuva 32).

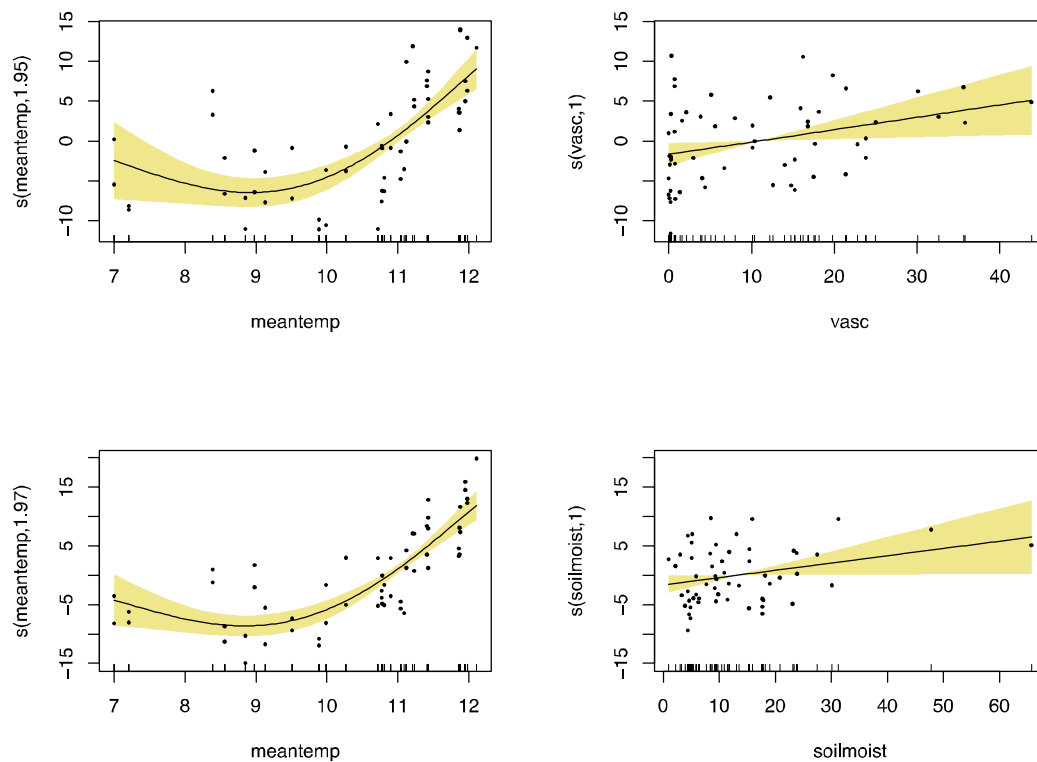


**Kuva 32. Mallit 1. ja 2. N=30 Kaukokartoitusaineistossa NDVI selittää tuotantoa, malli 1. ylärivillä. Respiraatiota selittävät NDVI ja lumen sulamispäivä, malli 2. alarivillä. Mallien epävarmuusalueet on väritetty vaaleankeltaisella.**

### GAM-mallit, in situ -mittaukset

In situ -mittauksista (N=57) malleihin valitsin tuotannon osalta keskilämpötilan ja putkilokasvien biomassan (malli 3, kuva 33). Respiraatiota kuvaavaan malliin valitsin keskilämpötilan ja maaperän kosteuden (malli 4, kuva 33). Mallissa 3. keskilämpötila ja putkilokasvien biomassa selittävät 60 % tuotannosta. Mallissa 4. ilman keskilämpötila ja maaperän kosteus selittävät 71,7 % respiraatiosta. Tarkempi mallien yhteenveto on liitteessä 5.

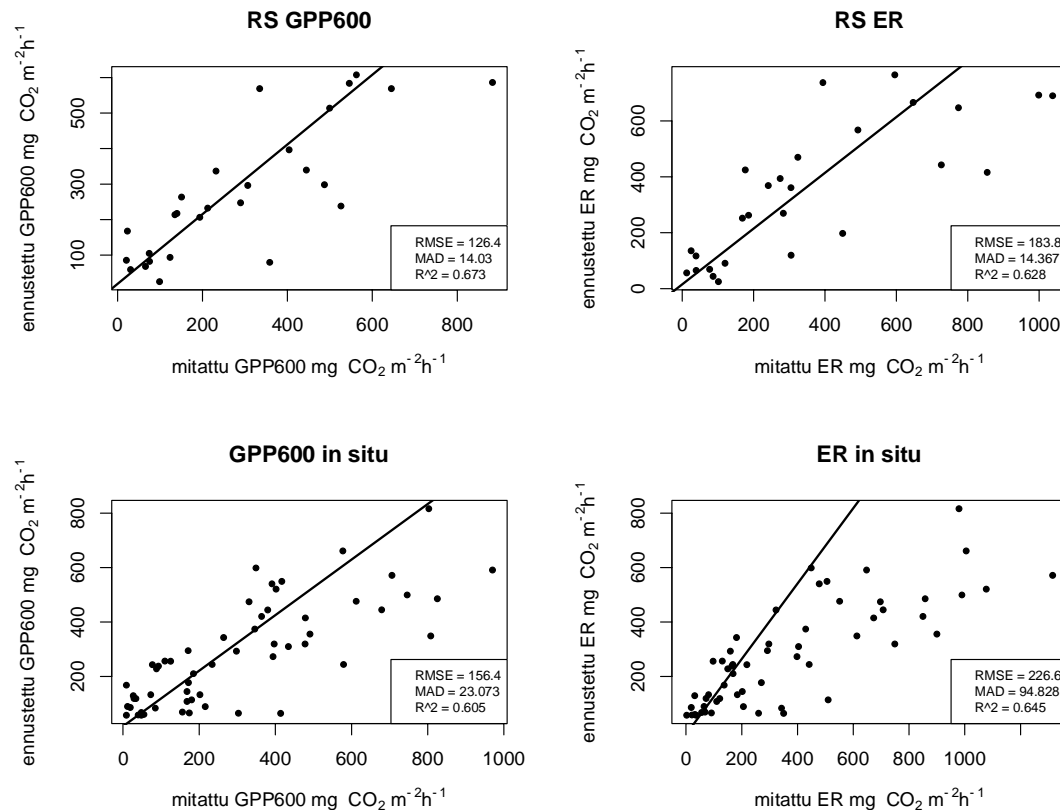




**Kuva 33.** In situ aineistossa tuotantoa selittää keskilämpötila ja putkilokasvien biomassa, malli 3, yläriivi. Respiraatiota selittää keskilämpötila ja maaperän kosteus, malli 4, alarivi. Mallien epävarmuusalueet on väritetty vaaleankeltaisella.

## Mallien validointi

Pienen otosmäärän aineistoilla ei ole mielekästä jakaa aineistoa erikseen evaluointi ja mallinnusosiin. Tässä tapauksessa mielekkäämpi validointitapa on *leave one out* -validointi, missä jokainen havainto jätetään yksi kerrallaan pois mallinnuksesta ja sille ennustetaan arvo. Näitä yksittäisiä ennustettuja arvoja verrataan mitattuihin arvoihin. Laskin ennustettujen ja mitattujen arvojen eroille RMS-virheen, keskimääräisen poikkeaman sekä selitysasteen (kuva 34). Lopuksi tein vielä yhteenvetokuvan merkitsevistä ympäristömuuttujista (kuva 35).



**Kuva 34.** Mallien *leave one out* -validoinnin tulokset, eli ennustetun ja mitatun arvon välinen riippuvuus. RMSE = root mean square error, MAD = mean absolute deviation, R² = selitysaste. R² asettuu kaikissa validoinneissa 0,605:n ja 0,673:n välille, kaikkien mallien ennustuskyky on siten samaa luokkaa.

## Selittävien muuttujien tärkeys malleissa

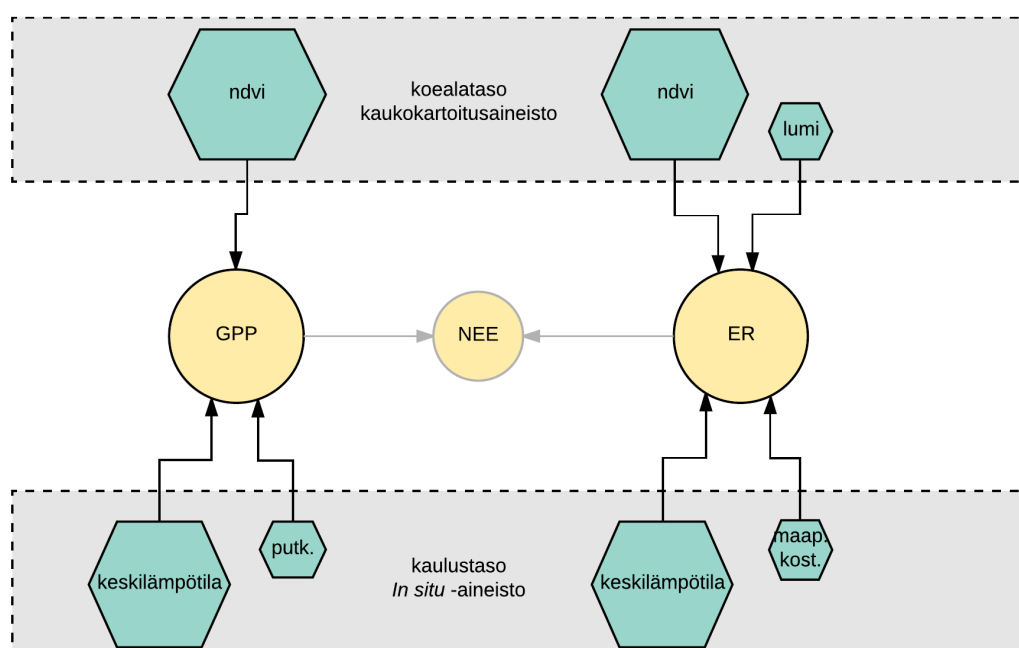
Tärkeysluvusta (taulukko 5.) näkee, että selittävät muuttujat jakautuvat voimakkaasti päämuuttujiin ja pieniarvoisiin muuttujiin. NDVI on tärkein selittäjä, sekä tuotannon että respiraation osalta kaukokartoitusaineistossa, keskilämpötila taas puolestaan on tärkein in situ -aineistossa molempien vastemuuttujien osalta.

**Taulukko 5.** Mallien selittävien muuttujien tärkeydet. Yhtä lähestyvä luku kuvaa suurta tärkeyttä, nollaa lähestyvä luku pientä tärkeyttä. Malleilla on selvästi päämuuttuja sekä pienempimerkityksinen muuttuja, paitsi mallissa 1, jossa on ainoastaan yksi selittävä muuttuja.

| malli 1. | tärkeys | malli 2.           | tärkeys |
|----------|---------|--------------------|---------|
| NDVI     | 0,98    | NDVI               | 0,97    |
|          |         | lumen sulamispäivä | 0,01    |

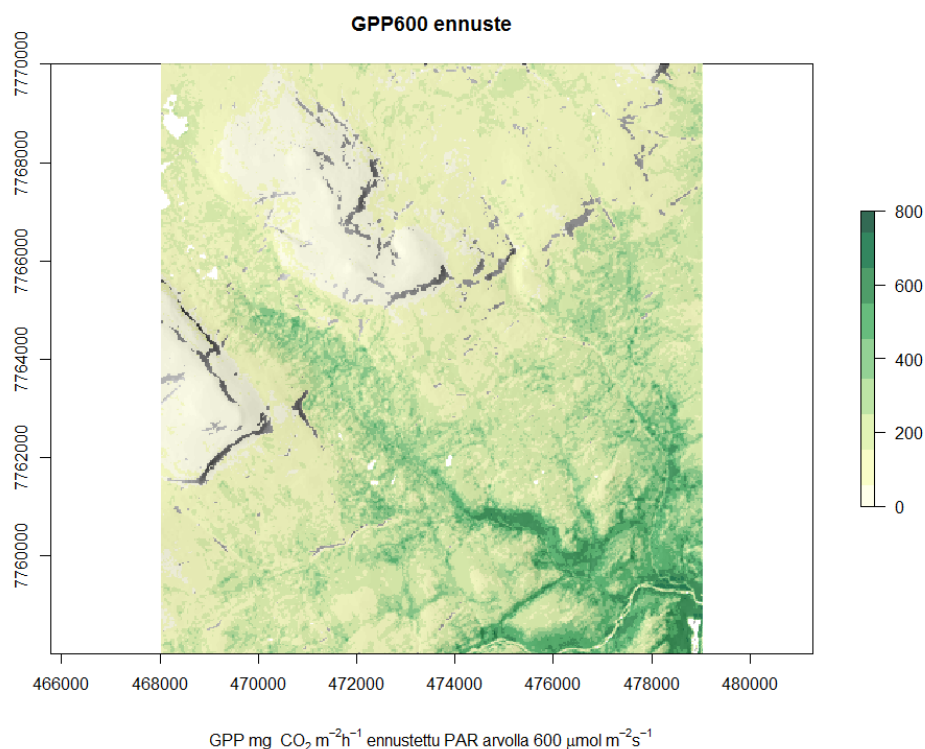
| malli 3.           | tärkeys | malli 4.       | tärkeys |
|--------------------|---------|----------------|---------|
| keskilämpötila     | 0,84    | keskilämpötila | 0,92    |
| putkilok. biomassa | 0,06    | maap. kosteus  | 0,02    |



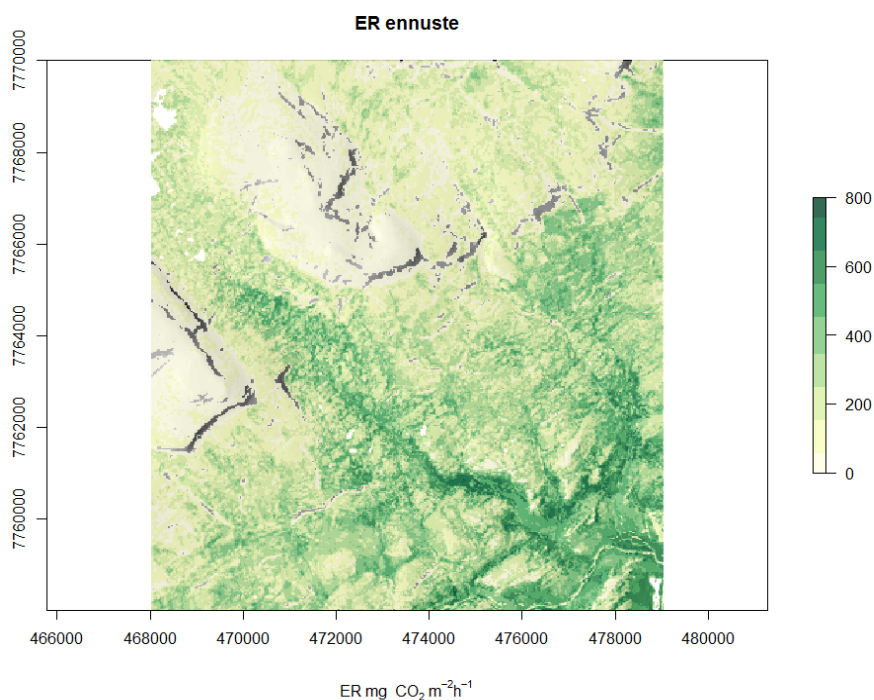
**Kuva 35.** Vastemuuttujiin positiivisesti vaikuttavat ympäristömuuttujat erikseen kaukokartoitusaineistolle ja *in situ* -aineistolle. Heksagonit kuvaavat selittäviä muuttujia, suurempi heksagoni voimakkaampaa vaikutusta.

## Alueelliset ennusteet

Tein kaukokartoitusaineiston GAM-malleista alueelliset ennusteet tuotannolle (kuva 36) sekä respiraatiolle (kuva 37). Leikkasin ennusteesta vesialueet pois. Mitatussa aineistossa ei ollut mittauksia kohteista joissa lumi sulaa vasta loppuvuodesta, lumen sulamisen myöhäisin päivä oli 196 d.o.y. Tutkimusalueella kuitenkin on varsin myöhään sulavia kohtia. Vääristymien ehkäisemiseksi leikkasinkin ennusteesta pois alueet, joilla lumi sulaa vasta 196 päivän jälkeen.



**Kuva 36. Kaukokartoitusaineistoon perustuva alueellinen ennuste tuotannolle Rastigaissan alueella. Ennuste on tehty tutkimuksessa luodun GAM-mallin avulla (malli 1.), jossa selittävänä muuttujana on NDVI. Ennustusaineistona on Landsat 8:n OLI -sensorin aineistoon perustuva NDVI-kuva.**



**Kuva 37. Kaukokartoitusaineistoon perustuva alueellinen ennuste respiraatiolle Rastigaissan alueella. Ennuste on tehty tutkimuksessa luodun GAM-mallin avulla (malli 2.), jossa selittävinä muuttujina on NDVI sekä lumen sulamispäivä. Ennustusaineistona on Landsat 8:n OLI -sensorin aineistoon perustuva NDVI-kuva.**

## Tulosten tarkastelu

Tutkimustulosten mukaan hiilidioksidivuohon vaikuttaa kaukokartoitusaineistossa koealatasolla erityisesti kasvillisuuden määrä mitattuna NDVI:llä. NDVI on odotettu selittäjä GPP:n osalta (Dagg ja Lafleur, 2010). Respiraation osalta myös lumen sulamispäivällä on hieman merkitystä. Topografia selittää pitkälti NDVI:tä (Riihimäki ym., 2017), ja siten voisikin topografian katsoa määrittelevän myös hiilidioksidivuota. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan kaikilla topografisilla muuttujilla löytynyt merkitsevää yhteyttä vastemuuttujiin, mihin voi vaikuttaa mm. pienehkö otoskoko.

Hiilidioksidivuon voimakkuus tutkimusalueella jakaantuu maisematasolla pitkälti NDVI:n jakaumaa vastaavasti. NDVI vaihtelee alueella huomattavasti, joten myös hiilidioksidivuo jakaantuu alueella voimakkaasti. Korkeus vaikuttaa huomattavasti kasvillisuuden määrään ja siten NDVI-arvoon. Kuten alueellisista ennusteista nähdään, saadaan suurimpia arvoja jokilaaksoissa tunturikoivikon alueella. Todellisuudessa vuot olisivat vielä tutkittua voimakkaampia tunturikoivikossa, koska kammiomittauksella ei voitu mitata itse tunturikoivujen vaikutusta. Pienintä vuo on suuren korkeuden ja jyrkkyyden alueilla vähäisen kasvillisuuden johdosta.

Respiraation osalta lumen sulamispäivän todettiin olevan merkitsevä. Vaikutus respiraatioon on positiivinen aina n. 155 päivään asti, minkä jälkeen vaikutus kääntyy negatiiviseksi. Voi sanoa, että ennen kesäkuuta ilmiö hyötyy sulavan lumen tarjoamasta kosteudesta, mutta kesäkuussa tai myöhemmin sulava alue ehtii olla vähemmän aikaa vapaana lumesta ja vaikutus on negatiivinen.

Kauluskohtaisessa in situ -aineistossa eniten vaikutusta GPP:lle on keskilämpötilalla ja putkilokasvien biomassalla. ER:n osalta merkittävä vaikutus on keskilämpötilalla ja pienessä määrin maaperän kosteudella. Ilman keskilämpötilaan vaikuttaa eniten korkeus merenpinnasta, joten matalimmalla jokilaaksoissa ilmiö on voimakkaimmillaan ja korkeimmalla huippujen tietämillä heikoimmillaan. Tämä sopii hyvin yhteen kaukokartoitusaineiston tulosten kanssa. Putkilokasvien biomassan vaikutus GPP:lle kertoo kasvillisuuden määrän positiivisesta vaikutuksesta ilmiöön, joka myöskin tukee kaukokartoitusaineistossa löytynyttä NDVI:n suurta vaikutusta. Hieman yllättävää on ettei maaperän lämpötilalla näyttänyt olevan yhteyttä respiraation

kanssa, koska sen on todettu olevan oleellinen muuttuja maaperän respiraatiolle (Davidson ja Janssens, 2006; Elberling ym., 2008).

Erillisten GPP ja ER mallien tunnuslukuja voi verrata Shaverin (2013) NEE -malliin, jossa huomattavasti suuremmalla otoksella (N=448) päästiin 0,759 selitysasteeseen. Selitysasteita (validoidut GPP 0,669; ER 0,629) voi siihen siten pitää melko korkeina. NEE -malli ei tosin ole sama asia kuin erilliset GPP ja ER mallit ja mittakaavakin on erilainen. GPP:lle ja ER:lle voi myöskin olettaa löytyvän suurempia korrelaatioita kuin NEE:lle, koska NEE saa kahdesta edellisestä vastakkaisesta arvosta koostuvana pienempiä lukuarvoja (Boelman ym., 2003)

NDVI:n ei ole kaikissa tutkimuksissa todettu selittävän kovinkaan hyvin respiraatiota (Dagg ja Lafleur, 2010). La Puma (2007) on pitänyt löytämänsä (selitysaste 0,36) yhteyttä NDVI:n ja respiraation välillä yllättävän suurena. Tämän tutkimuksen mallin 0,629 selitystetta ER:lle voinee pitää erikoisen korkeana, vaikkakin mallissa on mukana NDVI:n lisäksi lumen sulamispäivä. La Puman tutkimuksessa on kuitenkin aineistoa koko kasvukaudelta. Tämä tutkimus on puolestaan tehty heinä-elokuussa korkean biomassan aikaan NDVI:n ja respiraation välisen suhteen ollessa voimakkaimmillaan (Boelman ym., 2003), mikä saattaa näkyä mallin toimivuudessa. Tämä tutkimus myöskin edustaa vain yhtä tiettyä ajan hetkeä, temporaalisissa tutkimuksissa koko vuoden vaikutus vähentää NDVI:n merkitystä. NDVI:n ja respiraation suhde heikkenee syksyllä, koska NDVI-arvo laskee lehtien pudotessa kasvillisuudesta, mutta maaperän prosessit kuitenkin jatkuvat. Kasvukautta käsittelevässä tutkimuksessa (McMichael, 1999) on todettu NDVI:n ennustavan myös respiraatiota, tosin epäsuoran vaikutuksen kautta. On myös mahdollista, että NDVI:n spatiaalinen autokorrelaatio jossain määrin vääristää mallien toimivuutta parempaan suuntaan.

En saanut tässä tutkimuksessa eriteltyä heterotrofista ja autotrofista respiraatiota toisistaan. Autotrofinen respiratio on riippuvainen biomassasta, joten ER:n korkea korrelaatio NDVI:n kanssa voi kertoa biomassasta riippuvaisen autotrofisen respiraation suuresta osuudesta (Marushchak ym., 2013). Tätä tukisi myös se, ettei maaperän lämpötilalla näyttänyt olevan yhteyttä ER:n kanssa. NDVI voi välillisesti kuvata myös juurten biomassaa (McMichael, 1999), jolloin juurten respiratio voi lisätä NDVI:n ja ER:n yhteyttä.

Mittausaikoina vallinneelle keskimääräiselle valotasolle mallinnettu tuotanto ja siitä lasketun NEE:n perusteella tuotanto ja respiraatio näyttävät olevan lähellä tasapainoa, mediaaniarvo  $-3,5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-2}$  on niukasti nielun puolella. Mitään päätelmiä alueen varsinaisesta taseesta ei tästä tokikaan voi tehdä, koska aineisto edustaa temporaalisesti vain tiettyä ajankohtaa yhtenä päivänä. Kasvukauden lisäksi myös talviajan arvoillakin on huomattava vaikutus koko vuoden keskiarovihiin varsinkin muuttuvassa ilmastossa (Webb ym., 2016).

Vaikka pidentyneen kasvukauden on todettu voimistavan hiilidioksidin sitoutumista on tundran hiilidioksiditasapaino kallistumassa lähteen puolelle (Belshe ym., 2013; Hayes ym., 2011; McGuire ym., 2009). Tämä tutkimus on kuitenkin tehty kasvukauden aikana valoisaan vuorokaudenaikaan, jolloin suurin osa vuosittaisesta fotosynteesistä pitäisi tehdä. Siten olisi voinut olettaa mittaushetken tasapainon olevan vielä enemmän nielun puolella.

Tutkimuksen sujuvuuden perusteella kammiomenetelmä sopii tietyin varauksin käytettäväksi erämaisissa olosuhteissa. Riippuen tutkimusalueesta, kattavan otoksen kerääminen saattaa vaatia huomattavia panostuksia resursseihin. Haasteita aiheuttavat suurella tutkimusalueella nimenomaan aikaa vievät siirtymiset. Tilanne mutkistuu entisestään, mikäli koealalla käytäisiin etukäteen asentamassa kaulukset, kuten olisi syytä tehdä (Brummell ja Siciliano, 2011; Illeris ym., 2004). Tutkimusalueen valinnalla ja huolellisella suunnittelulla voidaan toki vaikuttaa työn sujuvuuteen, ja parhaimmillaan kohtuullisella työmäärällä voidaan saada tarpeellista aineistoa kerättyä. Sähköverkon ulkopuolella työskentely ja tarvittavien laitteiden käyttö maastossa eivät osoittautuneet ongelmiksi, vaikkakin järjestely vaatii huomattavia ennakkovalmisteluja.

## Luotettavuustarkastelu

### Mittauksien vuorokaudenaika

Maastotyövaiheessa jouduttiin tekemään tiettyjä kompromisseja lähinnä käytettävissä olevasta ajasta sekä tutkimusalueen laajuudesta ja olosuhteista johtuen. Mittauksia tehtiin päivisin vaihtelevasti n. 9:00 - 19:00 välillä riippuen kuljetuista etäisyyksistä. Optimioloissa kaikki mittaukset olisi tehtävä muutama tunti ennen ja jälkeen

keskipäivän (Shaver ym., 2013). Tämä vaatisi kuitenkin huomattavasti käytettävissä ollutta aikaa pidemmän kenttäjakson tai reilusti enemmän kalustoa ja kenttähenkilöstöä. Heinäkuussa tutkimusalueen leveysasteilla aurinko ei kuitenkaan laske horisontin alapuolelle, mikä tasaa jonkin verran eri vuorokaudenaikojen olosuhteita.

## Kauluksiin liittyvä epävarmuus

Tiettyä vääristymää aineistoon on voinut aiheutua mittauskauluksen asentamisesta maahan. Alueella on paljon kasvillisuutta, jossa varret ja juuret kulkevat maata pitkin ja ne saattavat katketa painettaessa kaulusta maahan. Aloimme kiinnittää tähän huomiota työn kuluksa, kun olimme huomanneet asian ensimmäisillä koealoilla. Kauluksia käytettäessä olisi syytä antaa juurten kasvaa takaisin kauluksen sisällä. Tähän voi tosin kaikkein pienimpien juurien osalta mennä jopa useita vuosia (Kutsch ym., 2009). Kahta vuorokautta on pidetty sopivana aikana kauluksen asettamisen ja mittauksen välillä (Illeris ym., 2004). Juurten katkeaminen voi aiheuttaa maaperän respiraation aliarviointia mittauksissa, mikäli respiraatiot eritellään toisistaan (Heinemeyer ym., 2011).

Havaittuamme ongelman kentällä kaulusta ei painettu maan sisään, vaan se ainoastaan tiivistettiin käytössä olleella kvartsihiekkapussilla. Haittana tässä menettelyssä on mahdollinen pieni kauluksen aiheuttama varjostus tilanteissa missä kasvillisuus on matalaa ja auringon säteilykulma pieni. Vaihtoehtona olisi ollut mitata kokonaan ilman kaulusta. Tällöin mittauksiin kuluva aika olisi kuitenkin kasvanut kohtuuttomasti, koska kauluksen tiivistys olisi pitänyt tehdä jokaisen mittauskerran välissä uudelleen. Tiivistys ei mahdollisesti olisi ylipäättään onnistunut riittävän hyvin ilman kaulusta.

Myöhemmän kesän 2016 Kilpisjärven mittauskampanjan aikana huomattiin, että myös hiekkasäkin käyttö tiivistämiseen saattaa vääristää mittaustuloksia tietyissä olosuhteissa. Kokeilimme mitata hiekkasäkillä tiivistetyn kauluksen ohella pelkällä kammioilla. Näin ei voi tehdä varsinaisia mittauksia, koska kammio alkaa pian vuotaa, mutta lyhyellä ajalla mittausta voi kokeilla. Havaitsimme, että hiekkasäkin asettaminen maahan saattaa vääristää mittaustulosta vapautuvan hiilidioksidin määrää lisäävästi (kuva 38).



Osittain kyse saattoi olla myös siitä, että ilman hiekkasäkkiä kammion tiivistymättömyys näkyi heti. Huomasimme myös, että ongelmaan auttaa tiivistyksen tekeminen edellisenä päivänä. Hiekkasäkin sijasta tiivistämiseen voi käyttää myös ns. muovihametta, kauluksen ympärille asetettavaa muovia joka pysyy painon avulla tiiviinä maata vasten (Fletcher ym., 2012; Shaver ym., 2007). Painona voidaan käyttää esim. metalliketjua. Kaulukset voi saada myös pysymään hyvin paikallaan painamatta niitä maahan käyttämällä kauluksia joiden pohjassa on piikit, ne pitävät kauluksen hyvin paikallaan mutta eivät häiritse maaperää (Pumpanen ym., 2010). Tällöinkin voi kuitenkin joutua tekemään jossain määrin tiivistystä. Uskon kuitenkin, että käytettyä tiivistystapaa merkittävämpää on kauluksien asennus hyvissä ajoin etukäteen.



**Kuva 38. Asetettaessa hiekkasäkki tiivistämään kammiota, lähti hiilidioksidipitoisuus nousuun. Vastaavasti kun hiekkasäkki poistettiin, laski pitoisuus jälleen.**

Kaulukseen voi liittyä muitakin ongelmia. Jos kasvillisuus on kovinkin maan myötäistä tai hyvin matalaa, voi kaulus varjostaa kammion sisälle pääsevää valoa ja siten rajoittaa fotosynteesiä mittauksen aikana. Varjostusta on mahdollista vähentää käyttämällä matalampia kauluksia, vaikkakin jossain tapauksissa kauluksen korkeuden olisi syytä lähestyä nollaa varjostuksen ehkäisemiseksi. Kauluksien korkeus pitäisi ennakoida koealan kasvillisuuden korkeuden mukaan. Varjostusongelma helpottuisi toki myös, mikäli mittauksia voitaisiin tehdä vain optimiaikaan päivästä.

## Kaulusten paikkojen valinta

A- ja B-kaulusten sijoittelu tehtiin kentällä valitsemalla subjektiivisesti runsaamman ja harvemman kasvillisuuden kohteet yhdeltä koealalta. Tämä aiheutti hieman ongelmia aineiston käsittelyssä, koska näistä laskettu keskiarvo ei välttämättä kuvaa koealan keskimääräisiä olosuhteita. Saattaisikin olla mielekästä valita koealalta kaksi mahdollisimman hyvin koealan kasvillisuutta edustavaa kauluksen paikkaa, tällöin niiden keskiarvo edustaisi todennäköisimmin hyvin koealan olosuhteita. Näin voitaisiin välttyä osin subjektiivisesti määritettyjen painotuskertoimien käytöltä.

Systemaattinen otanta esim. tietyiltä etäisyyksiltä ja tietyistä suunnista koealan keskipisteestä voisi toki myös tulla kysymykseen. Tällöin voi kuitenkin syntyä tilanne, jossa mitataan kahta varsin karua kohtaa, vaikka koealalla toisaalla olisikin runsaammin kasvillisuutta. Tällainen otanta vaatisikin huomattavasti enemmän kuin kaksi mittauskaulusta kultakin koealalta.

## Ilman lämpeneminen kammion sisällä

Mitattaessa kammiolla aurinkoisessa säässä, toimii kammiokasvihuoneena mikä nostaa lämpötilaa mittauksen aikana kammion sisällä. Tästä voi aiheutua vääristymiä mittaustuloksiin. Ongelmaa olisi mahdollista vähentää vesikiertoisella jäähdytysjärjestelmällä (Marushchak ym., 2013) tai esim. kylmäpatruunoita käyttämällä. Nämä menetelmät eivät kuitenkaan tule kyseeseen tämän tutkimuksen kaltaisissa olosuhteissa.

## Himmennettyjen mittausten määrä

Valotasojen lisääminen mittausohjelmaan olisi mielekästä valovastekäyrien määrittämisen helpottamiseksi. Jatkossa voisi tarvittaessa harkita kolmen rinnakkaisen mittauksen vähentämistä ja valotasojen lisäämistä esimerkiksi kahteen himmennettyyn tasoon kuten Elsgaard ym. (2012) on tehnyt. Toisaalta tästä aineistosta on jo nyt havaittu että, rinnakkaisista mittauksista on hyötyä. On myös mahdollista tehdä rinnakkaismittauksetkin keskenään eri valotasolla siten, että ne eroavat hieman toisistaan ja siten yksittäisissä mittauksissa säteilyn määrä nousisi tasaisesti.

Esimerkiksi seuraavan kesän 2016 Kilpisjärven mittauskampanjassa mittauksia lisättiinkin siten että valotasoja lisättiin nimellisesti neljään. Lisäksi rinnakkaismittauksissa pyrittiin saamaan myös mittauksia eri valotasolla. Tällöin on parhaimmillaan käytössä 12 yksittäistä eri valotasolla tehtyä mittausta, ja valovastekäyrän sovittaminen on luotettavampaa.

Yhdellä tutkimusalalla käytettyä kokonaisaikaa on järkevää pidentää ainoastaan, jos kenttätöille on käytettävissä selkeästi pidempi aika tai enemmän kalustoa ja kenttähenkilöstöä. Kovin suurta määrää eri valotasoja ei tämän tyyppisellä asetelmalla ole mahdollista mitata. Mittalaitteiden tallennuskapasiteetti tulee myös nopeasti

vastaan, mikäli mittauksia lisättäisiin merkittävästi. Mittausajan lyhentäminen voisi olla paras vaihtoehto ongelman ratkaisemiseksi

Mikäli yksittäisten mittausten aikana valaistusolosuhteet vaihtuivat, jouduttiin PAR-säteilystä laskemaan keskiarvo mittausajalle. Tämä saattaa aiheuttaa vääristymää, koska kasvillisuus reagoi nopeammin säteilymäärän putoamiseen kuin sen nousuun (Barradas ja Jones, 1996). Keskiarvossa saattaa jäädä myöskin lyhyt huippu tai notkahdus huomiotta. Olisi hyödyllistä, jos PAR-mittari olisi kytketty samaan tiedonkeruulaitteeseen hiilidioksidianturin kanssa ja tieto PAR-säteilystä tallentuisi tiheällä tallennusvälillä suoraan samaan tiedostoon (Elsgaard ym., 2012). Näin keskiarvo saataisiin laskettua ohjelmoidusti tiheästi mitatusta aineistosta. Aineiston käsittely nopeutuisi ja luotettavuus paranisi. PAR-säteilyä tallentava laitteisto olisi kuitenkin huomattavasti kalliimpi kuin nyt käytössä ollut.

## NDVI-aineiston resoluutio

Käytin NDVI-aineistona *Landsat 8:n OLI* -sensorin aineistosta laskettua 30 metrin tarkkuuksista kuvaa. 30 m \* 30 m kokoinen ruutu maastossa saa siis aina yhteisen NDVI-arvon. Ongelma kaukokartoitusaineistoissa tässä yhteydessä on se, että parhaankaan resoluution kuvilla ei pystytä määrittelemään yksittäisen mittauskauluksen arvoa. Kyseessä on aina keskiarvo hieman suuremmasta alueesta. Koska kasvillisuuden määrä vaihtelee tällaisilla tutkimusalueilla voimakkaasti pienilläkin etäisyyksillä, olisi hyvä, jos NDVI:n voisi itse mitata kentällä jokaisesta kauluksesta. Onkin olemassa kameroita, joilla NDVI:n voi mitata kentällä (Dagg ja Lafleur, 2010).

Toinen vaihtoehto olisi mitata kohteesta LAI (leaf area index, lehtialaindeksi). NDVI:n, biomassan ja LAI:n välillä on selkeä korrelaatio (Goswami ym., 2015). LAI voi myös selittää jopa 90% GPP:stä, (Marushchak ym., 2013) joten LAI olisi siten hyödyllinen ympäristömuuttuja tutkittaessa hiilidioksidivuota. LAI on mahdollista määrittää kentällä esimerkiksi ottamalla valokuva mittauskauluksen kohdalta, ja analysoimalla kuva GreenCropTracker -ohjelmistolla (Liu ja Pattey, 2010). Näin saataisiin tämä ympäristömuuttuja aineistoon lisäämättä kuitenkaan välineistöä, sillä digitaalikamera tai ainakin matkapuhelin on yleensä muutenkin mukana kentällä. On myös mahdollista kuvata tutkimusalue NDVI-kameralla varustetulla UAV (Unmanned Aerial Vehicle) -

kalustolla eli pienoishelikopterilla, jolloin saadaan mahdollisesti hyvinkin tarkka aineisto koko alueen NDVI-arvoista.

## Mittaushetken sääolot

Sade vaikuttaa mittauksista saataviin tuloksiin (Elberling ym., 2008), emmekä tehneetkään mittauksia sateen aikana. Sateisen kelin jälkeen tehtyjen mittausten laatu on kuitenkin saattanut kärsiä. Sateen jälkeen respiraatio voi näyttää mittauksissa suurempia arvoja kuin ennen sadetta. Vesi tiivistää maata hidastaen hiilidioksidin kulkemista. Tämä sateen aikana maahan kerääntynyt hiilidioksidi purkautuu sateen jälkeen maan kuivettua sadetta edeltävään tasoon (Doff Sotta ym., 2004). On vaikea päätellä, kuinka kauan sateen jälkeen pitäisi odotella ennen mittausten aloittamista.

Sade ja kosteus voivat vaikuttaa myös antureiden luotettavuuteen. Antureille olisi mahdollista tehdä esilämmitys, jossa sähkövastuksen avulla anturista haihdutetaan ylimääräinen kosteus pois. Ennakkotyövaiheessa ei kuitenkaan ollut aikaa selvittää kuinka paljon toiminnon käyttö vaikuttaa mittalaitteen akun kestoon, joten esilämmitystä ei käytetty tässä tutkimuksessa. Myös voimakas tuuli voi vääristää mittaustuloksia. Esim. Natali (2011) on karsinut mittaukset jotka oli tehty yli  $7 \text{ ms}^{-1}$  tuulessa.

## Vihreä biomassa

Biomassan korrelaatio voisi olla suurempi, mikäli vihreä biomassa olisi punnittu erikseen. Kokonaisbiomassa ei kerro yhteyttävän biomassan määrää, vaan siihen tarvittaisiin punnitus erikseen nimenomaan yhteyttävästä vihreästä biomassasta (Goswami ym., 2015). Vihreän biomassan erittely veisi tosin huomattavasti enemmän työaikaa punnitusten osalta.

## Tunturikoivikon alue

Pieni osa tutkimusalueesta sijaitsee tunturikoivikon alueella. Tunturikoivut ovat korkeita kasveja, eikä niitä voida mitata tällaisella kammiomenetelmällä. Tunturikoivut rajautuivatkin tutkimuksen ulkopuolelle, ja näiden alueiden osalta kyseessä ei ole ekosysteemin kokonaisvaihtoa käsittelevä tutkimus vaan kenttäkerrokseen rajautuva tutkimus. Koivikko voi kuitenkin vaikuttaa alueelta mitattuun maaperän respiraatioon mm. juuriston kautta. Tunturikoivujen yhteyttämistä olisi mahdollista mitata laitteella,

joka tutkii esim. yksittäisen lehden tuotantoa. Tieto olisi sitten kuitenkin skaalattava suurempaan mittakaavaan, mikä monimutkaistaisi aineiston käsittelyä.

## Kammion himmennys

Vaikka kammio on valmistettu kirkkaasta muovista, himmentää se itsessäänkin hieman valotasoa. Katsoin tämän kuitenkin todennäköisimmin merkityksettömäksi, koska siitä aiheutuva pieni himmennys on yhteneväinen kaikilla mittauksilla. Kammioista on syytä pitää hyvää huolta ja suojata ne kunnolla kuljetuksessa, koska ajan myötä niihin mahdollisesti tulevat kolhut ja naarmut lisäävät kammion omaa himmennystä ja tekevät niistä keskenään erilaisia.

## Muita huomioita

Muutamasta mittaustiedostosta puuttui yksittäisiä arvoja, esimerkiksi koealan 82 A-kauluksen kolmas himmennetty mittausta sisälsi vain kolme pitoisuusarvoa kymmenestä. Kyseessä lienee jo mittalaitteistossa syntynyt ongelma. Yhteys anturin ja mittalaitteen välillä on saattanut hetkeksi katketa. Tätä teoriaa tukee se, että kosteus- ja lämpötila-arvot ovat kuitenkin tallentuneet. Yhteys niitä mittaavan anturiin on siis ollut kunnossa. Näiden tietojen puuttumista voidaan kuitenkin paikata kolmen rinnakkaisen mittauksen turvin.

Inhimilliset virheet saattavat myös aiheuttaa vääristymää aineistoon. Virheitä saattaa syntyä mm. kammion huolimattomasta asettelusta kaulukselle, virheellisistä asetuksista datankeruulaiteessa, varomattomasta liikkumisesta mittauksen aikana, käsin muistiin kirjoitetun aineiston tietokoneelle syötössä sekä aineiston jälkikäsittelyssä.

## Jatkotutkimus

### Otoskoko

Luotettavamman tilastollisen analysoinnin pohjaksi olisi otoskokoa saatava suurennettua. Käytännössä se vaatisi suuremmat resurssit kenttätyövaiheeseen. Tutkimusta voisi tehdä pienemmällä alueella jolloin saataisiin lyhyempien siirtymien turvin kasvatettua otoskokoa, mutta ympäristögradienttien kattavuus voisi tuolloin kärsiä. Kenttätyövaiheen pidentäminen olisi mahdollisesti yksi ratkaisu tiettyyn

pisteeseen asti, mutta silloin olisi huolehdittava siitä, että olosuhteet eivät muutu liikaa jakson aikana. Suuremmalla määrällä mittauskalustoa ja kenttätöntyöntekijöitä voisi otoskokoa kasvattaa tälläkin tutkimusalueella. Mittausajan lyhentäminen mahdollistaisi vastaavasti myös useamman mittauksen tekemisen samassa ajassa.

## Mikrometeorologinen kovarianssimenetelmä

Kammiomittauksia tukemaan voisi perustaa tutkimusalueelle mikrometeorologiseen kovarianssimenetelmään (Aubinet ym., 2012) perustuvan mittausaseman tietyksi ajaksi. Tällä menetelmällä ei saada alueellisia eroja kartoitetuksi, mutta saadaan mukaan temporaalinen aspekti ja mahdollistettaisiin kammiomittausten vertailu mikrometeorologisella kovarianssimenetelmällä saatuihin mittaustuloksiin.

## Valaistusolosuhteiden hallinta

Hiilidioksidivuomittauksissa nopein vaikutus mittaustuloksiin on PAR-säteilyn määrällä, johon puolestaan eniten vaikuttaa pilvisyys. Tasaisen mutta riittävän säteilyn tarjoavaa keliä ei usein ole mahdollista odotella. Yksi vaihtoehto säteilyn yhdenmukaistamiseksi voisi olla kammiotyyppi joka olisi pimennetty vallitsevalta valolta, ja kammioon olisi rakennettu keinopäivänvalolähde.

Tällöin olisi mahdollista säätää PAR-säteilyn voimakkuus kontrolloidusti eri tasoille. Riippuvuus pilvisyydestä vähenisi ja eri himmennystason mittaaminen olisi helpompaa kuin päivänvalon kanssa käytettyjen himmennysrakennelmien kanssa. Tällaista keinovaloon perustuvaa mittausta on käytetty tutkimuksissa kasvihuoneolosuhteissa (Barradas ja Jones, 1996; McDermitt ym., 1989; Pimentel ym., 2004), mutta keinovalon käytöstä kentällä kammiomittauksissa ei löydy merkintöjä kirjallisuudesta.

Keinovalon käyttö vaatisi lisää akkukapasiteettia, mutta LED -tekniikalla se ei välttämättä muodostuisi kynnyskysymykseksi. Ongelmaksi saattaisi ennemminkin muodostua valonlähteen etäisyys kasvillisuudesta, joka olisi tällaisen kammion tapauksessa melko pieni. Valon voimakkuus kohteessa vähenee käänteisesti valonlähteen etäisyyden neliössä (Science Buddies Staff, 2017), joten kasvillisuuden korkeus kammion sisällä vaikuttaisi huomattavasti sille lankeavan valon

voimakkuuteen. Suuremman pinta-alan valonlähde tai korkeampi kammio voisivat kuitenkin helpottaa tätä ongelmaa.

## Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella NDVI:llä on selkeä yhteys sekä ER:n että GPP:n kanssa koealatasolla. Siten kaukokartoituksella hankittavaa NDVI-arvoa voidaan käyttää molempien vasteiden alueellisessa mallintamisessa etenkin korkean NDVI-arvon aikaan. Respiraation osalta hieman lisätarkkuutta saadaan käyttämällä lumen sulamisajankohtaa. Keskilämpötilan merkitys on puolestaan in situ -aineiston perusteella huomattava sekä ER:lle että GPP:lle. Lämpötila näyttääkin määrittelevän pitkälti näiden ilmiöiden voimakkuutta sekä suoraan, mutta myös välillisesti vaikuttamalla kasvillisuuden määrään ja siten NDVI:n arvoon.

Kammiotekniikka osoittautui maastossa kohtuullisen hyvin toimivaksi mittaussmenetelmäksi. Lukuisat luotettavuuteen liittyvät tekijät on kuitenkin syytä pitää mielessä ja kehittää menetelmää edelleen luotettavuuden parantamiseksi. Kenttätyövaihetta ei voi pitää ainoastaan mekaanisena mittaustyönä, vaan on jatkuvasti arvioitava eri epäluotettavuustekijöiden vaikutusta tuloksiin. Nämä kokemukset erämaassa osoittavat, että menetelmää on hyvällä valmistautumisella mahdollista käyttää hankalissakin olosuhteissa. Mahdollisuudet eivät rajoitu ainoastaan tundralle, vaan tutkimus on mahdollista kaikkialla missä kasvillisuus vain on riittävän matalaa.

## Kiitokset

Kiitän Societas pro Fauna et Flora Fennicaa taloudellisesta tuesta. Kiitän professori Miska Luotoa ja professori Janne Rinnettä työskentelyni ohjaamisesta. Kiitän Anna Virkkalaa huomattavasta panostuksesta tutkimuksen kenttätöihin sekä erinomaisesta yhteistyöstä aineiston käsittelyvaiheessa. Kiitän Elina Puhjoa osallistumisesta kenttätöihin. Kiitän Matti Räsästä avusta kammion tiivistyskysymysten kanssa ja avusta aineiston käsittelyssä. Kiitän Liisa Kulmalaa hyvästä johdatuksesta kammiotekniikan pariin. Kiitän Pekka Niittystä avusta kaukokartoitusaineistojen kanssa ja Henri Riihimäkeä opastuksesta biomassatutkimuksessa. Kiitän Geotieteiden ja maantieteen laitosta resursseista. Suuri kiitos kuuluu myös edellisten lisäksi kaikille

muillekin samaan aikaan Rastigaisalla kenttätöitä kesällä 2015 tehneille: Kyösti Kanerva, Julia Kemppinen, Joonas Koskinen, Atte Laaka, Heidi Mod. Yksin tämä työ ei olisi syntynyt.

## Kirjallisuus

- Aalto, J., Riihimäki, H., Meineri, E., Hylander, K. & Luoto, M. 2017. Revealing topoclimatic heterogeneity using meteorological station data. *International Journal of Climatology* **37**: 544-556.
- Arndal, M. F., Illeris, L., Michelsen, A., Albert, K., Tamstorf, M. & Hansen, B. U. 2009. Seasonal Variation in Gross Ecosystem Production, Plant Biomass, and Carbon and Nitrogen Pools in Five High Arctic Vegetation Types. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **41**: 164-173.
- Aubinet, M., Papale, D. & Vesala, T. 2012. Eddy covariance : A practical guide to measurement and data analysis. Springer, Dordrecht.
- Bäckstrand, K., Crill, P., Mastepanov, M., Christensen, T. & Bastviken, D. 2008. Non-methane volatile organic compound flux from a subarctic mire in Northern Sweden. *Tellus B* **60**: 226-237.
- Barradas, V. & Jones, H. 1996. Responses of CO<sub>2</sub> assimilation to changes in irradiance: laboratory and field data and a model for beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Experimental Botany* **47**: 639-645.
- Belshe, E. F., Schuur, E. A. G. & Bolker, B. M. 2013. Tundra ecosystems observed to be CO<sub>2</sub> sources due to differential amplification of the carbon cycle. *Ecology Letters* **16**: 1307-1315.
- Björn, L. O. 2015. Photobiology : The science of life and light. 3. painos. Springer, New York.
- Boelman, N. T., Stieglitz, M., Rueth, H. M., Sommerkorn, M., Griffin, K. L., Shaver, G. R. & Gamon, J. A. 2003. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia* **135**: 414-421.
- Bond-Lamberty, B. & Thomson, A. 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* **464**: 579-582.
- Brummell, M. E. & Siciliano, S. D. 2011. Measurement of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and water potential in soil ecosystems. *Methods in Enzymology* **496**: 115-137.



- Bulk rename utility. 2015. Bulk rename utility computer program. TGRMN Software.
- Cahoon, S. M. P., Sullivan, P. F. & Post, E. 2016. Greater Abundance of *Betula nana* and Early Onset of the Growing Season Increase Ecosystem CO<sub>2</sub> Uptake in West Greenland. *Ecosystems* **19**: 1149-1163.
- Cahoon, S. M. P., Sullivan, P. F., Post, E. & Welker, J. M. 2012. Large herbivores limit CO<sub>2</sub> uptake and suppress carbon cycle responses to warming in West Greenland. *Global Change Biology* **18**: 469-479.
- Curasi, S., Loranty, M. & Natali, S. 2016. Water track distribution and effects on carbon dioxide flux in an eastern Siberian upland tundra landscape. *Environmental Research Letters* **11**: 045002.
- Dagg, J. & Lafleur, P. 2010. An application of plot-scale NDVI in predicting carbon dioxide exchange and leaf area index in heterogeneous subarctic tundra. *Canadian Journal of Remote Sensing* **36**: S111-S123.
- Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B. & Sabzalian, M. R. 2014. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **369**:
- Davidson, E. A., Savage, K., Verchot, L. V. & Navarro, R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**: 21-37.
- Davidson, E. A. & Janssens, I. A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **440**: 165-173.
- Doff Sotta, E., Meir, P., Malhi, Y., Donato nobre, A., Hodnett, M. & Grace, J. 2004. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a tropical forest in the central Amazon. *Global Change Biology* **10**: 601-617.
- Elberling, B., Nordstrom, C., Grondahl, L., Sogaard, H., Friborg, T., Christensen, T. R., Strom, L., Marchand, F. & Nijs, I. 2008. High-arctic soil CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production controlled by temperature, water, freezing and snow. *Advances in Ecological Research, Vol 40: High-Arctic Ecosystem Dynamics in a Changing Climate* **40**: 441-472.
- Elsgaard, L., Görres, C., Hoffmann, C. C., Blicher-Mathiesen, G., Schelde, K. & Petersen, S. O. 2012. Net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **162**: 52-67.
- Ernakovich, J. G., Hopping, K. A., Berdanier, A. B., Simpson, R. T., Kachergis, E. J., Steltzer, H. & Wallenstein, M. D. 2014. Predicted responses of arctic and alpine ecosystems to altered seasonality under climate change. *Global Change Biology* **20**: 3256-3269.

- Esri. 2017. ArcGis Desktop: Release 10.3.1. Environmental Systems Research Institute. Redlands, Ca.
- Esri. 2015. ArcGis World Imagery basemap. Environmental Systems Research Institute. Redlands, Ca.
- Fletcher, B. J., Gornall, J. L., Poyatos, R., Press, M. C., Stoy, P. C., Huntley, B., Baxter, R. & Phoenix, G. K. 2012. Photosynthesis and productivity in heterogeneous arctic tundra: consequences for ecosystem function of mixing vegetation types at stand edges. *Journal of Ecology* **100**: 441-451.
- Fu, G., Zhang, X., Zhang, Y., Shi, P., Li, Y., Zhou, Y., Yang, P. & Shen, Z. 2013. Experimental warming does not enhance gross primary production and above-ground biomass in the alpine meadow of Tibet. *Journal of Applied Remote Sensing* **7**:
- Giraudoux, P. 2017. Pgirness: Data analysis in ecology. R-paketti.
- Goswami, S., Gamon, J., Vargas, S. & Tweedie, C. 2015. Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska. *PeerJ PrePrints* **3:e913v1**:
- Guisan, A., Edwards, T. C. & Hastie, T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling* **157**: 89-100.
- Han, Y. & Tokunaga, T. K. 2014. Calculating carbon mass balance from unsaturated soil columns treated with CaSO<sub>4</sub>-minerals: Test of soil carbon sequestration. *Chemosphere* **117**: 87-93.
- Hastie, T. & Tibshirani, R. 1987. Generalized Additive Models: Some Applications. *Journal of the American Statistical Association* **82**: 371-386.
- Hayes, D. J., McGuire, A. D., Kicklighter, D. W., Gurney, K. R., Burnside, T. J. & Melillo, J. M. 2011. Is the northern high-latitude land-based CO<sub>2</sub> sink weakening? *Global Biogeochemical Cycles* **25**:
- Heinemeyer, A., Di Bene, C., Lloyd, A. R., Tortorella, D., Baxter, R., Huntley, B., Gelsomino, A. & Ineson, P. 2011. Soil respiration: implications of the plant-soil continuum and respiration chamber collar-insertion depth on measurement and modelling of soil CO<sub>2</sub> efflux rates in three ecosystems. *European Journal of Soil Science* **62**: 82-94.
- Hikosaka, K., Hikosaka, K., Niinemets, U. & Anten, N. P. R. 2016. Canopy photosynthesis : From basics to applications. Springer, Dordrecht.
- Hjort, J. & Luoto, M. 2011. Novel theoretical insights into geomorphic process–environment relationships using simulated response curves. *Earth Surface Processes and Landforms* **36**: 363-371.

- Illeris, L., K  nig, S. M., Grogan, P., Jonasson, S., Michelsen, A. & Ro-Poulsen, H. 2004. Growing-Season Carbon Dioxide Flux in a Dry Subarctic Heath: Responses to Long-term Manipulations. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **36**: 456-463.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jacobson, M. C. 2000. Earth system science : From biogeochemical cycles to global change. Academic Press, San Diego, Calif.
- Jacovides, C. P., Timvios, F. S., Papaioannou, G., Asimakopoulos, D. N. & Theofilou, C. M. 2004. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**: 135-140.
- Jia, G. J., Epstein, H. E. & Walker, D. A. 2006. Spatial heterogeneity of tundra vegetation response to recent temperature changes. *Global Change Biology* **12**: 42-55.
- Kartverket. 2017. Digital terrengmodell 10 m. [www.kartverket.no](http://www.kartverket.no)
- Kirschbaum, M. & Mueller, R. 2001. Net Ecosystem Exchange : Workshop proceeding.
- Kulmala, L. 2015. Suullinen tiedonanto 12.5.2015 Viikiss  .
- Kulmala, L., Aaltonen, H., Berninger, F., Kieloaho, A., Levula, J., Baeck, J., Hari, P., Kolari, P., Korhonen, J. F. J., Kulmala, M., Nikinmaa, E., Pihlatie, M., Vesala, T. & Pumpanen, J. 2014. Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clear-cutting and partial burning of slash. *Agricultural and Forest Meteorology* **188**: 33-44.
- Kulmala, L., Launiainen, S., Pumpanen, J., Lankreijer, H., Lindroth, A., Hari, P. & Vesala, T. 2008. H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes at the floor of a boreal pine forest. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* **60**: 167-178.
- Kutsch, W., Bahn, M. & Heinemeyer, A. 2009. Soil carbon dynamics : An integrated methodology. Cambridge University Press, Cambridge.
- La Puma, I. P., Philippi, T. E. & Oberbauer, S. F. 2007. Relating NDVI to ecosystem CO<sub>2</sub> exchange patterns in response to season length and soil warming manipulations in arctic Alaska. *Remote Sensing of Environment* **109**: 225-236.
- Lawlor, D. W. 2001. Photosynthesis. 3. painos. BIOS, Oxford.
- Liu, J. & Pattey, E. 2010. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**: 1485-1490.

- Livingston, G. P. 1995. Enclosure-based measurement of trace gas exchange; applications and sources of error. Oxford, United Kingdom: Blackwell Science.
- Lund, M., Lafleur, P. M., Roulet, N. T., Lindroth, A., Christensen, T. R., Aurela, M., Chojnicki, B. H., Flanagan, L. B., Humphreys, E. R., Laurila, T., Oechel, W. C., Olejnik, J., Rinne, J., Schubert, P. & Nilsson, M. B. 2010. Variability in exchange of CO<sub>2</sub> across 12 northern peatland and tundra sites. *Global Change Biology* **16**: 2436-2448.
- Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S. L., Scholzee, E. -, Jung, M., Zaehle, S., Schelhaas, M. J., Reichstei, M., Churkina, G., Papale, D., Abril, G., Beer, C., Grace, J., Loustau, D., Matteucci, G., Magnani, F., Nabuurs, G. J., Verbeeck, H., Sulkava, M., Van Der Werf, G. R. & Janssen, I. A. 2010. The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology* **16**: 1429-1450.
- Mariscal, M. J., Orgaz, F. & Villalobos, F. J. 2000. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **100**: 183-197.
- Marushchak, M. E., Kiepe, I., Biasi, C., Elsakov, V., Friborg, T., Johansson, T., Soegaard, H., Virtanen, T. & Martikainen, P. J. 2013. Carbon dioxide balance of subarctic tundra from plot to regional scales.
- Matsuura, S. 2011. Evaluation of a portable chamber system for soil CO<sub>2</sub> efflux measurement and the potential errors caused by internal compensation and water vapor dilution. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**: 127-137.
- McDermitt, D., Arkebauer, T., Norman, J., Welles, J., Davis, R., S., Ball, T., Arkebauer, T. & Welles, J. 1989. CO<sub>2</sub> response curves can be measured with a field-portable closed-loop photosynthesis system. *Forest Tree Physiology* **46**: 416-420.
- McFadden, J. P., Eugster, W. & Chapin, F. S. 2003. A regional study of the controls on water vapor and CO<sub>2</sub> exchange in arctic tundra. *Ecology* **84**: 2762-2776.
- McGuire, A. D., Anderson, L. G., Christensen, T. R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D. J., Heimann, M., Lorenson, T. D., Macdonald, R. W. & Roulet, N. 2009. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs* **79**: 523-555.
- McMichael, C. E. 1999. Estimating CO<sub>2</sub> exchange at two sites in Arctic tundra ecosystems during the growing season using a spectral vegetation index. *International Journal of Remote Sensing* **20**: 683-698.
- Millenaar, F., F. & Lambers, H. 2003. The alternative oxidase: In vivo regulation and function. Kirjassa: Anonymous ss. 2-15.
- Mod, H. K. & Luoto, M. 2016. Arctic shrubification mediates the impacts of warming climate on changes to tundra vegetation. *Environmental Research Letters* **11**: 124028.

- Myers-Smith, I. H., Forbes, B. C., Wilmking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., Tape, K. D., Macias-Fauria, M., Sass-Klaassen, U., L  vesque, E., Boudreau, S., Ropars, P., Hermanutz, L., Trant, A., Collier, L. S., Weijers, S., Rozema, J., Rayback, S. A., Schmidt, N. M., Schaepman-Strub, G., Wipf, S., Rixen, C., M  nard, C. B., Venn, S., Goetz, S., Andreu-Hayles, L., Elmendorf, S., Ravolainen, V., Welker, J., Grogan, P., Epstein, H. E. & Hik, D. S. 2011. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters* **6**: 045509.
- Natali, S. M., Schuur, E. A. G., Trucco, C., Hicks Pries, C. E., Crummer, K. G. & Baron Lopez, A. F. 2011. Effects of experimental warming of air, soil and permafrost on carbon balance in Alaskan tundra. *Global Change Biology* **17**: 1394-1407.
- Niittynen, P. & Luoto, M. 2017. The importance of snow in species distribution models of Arctic vegetation. *Ecography*
- Ny  k  nen, H., Heikkinen, J. E. P., Pirinen, L., Tiilikainen, K. & Martikainen, P. J. 2003. Annual CO<sub>2</sub> exchange and CH<sub>4</sub> fluxes on a subarctic palsamire during climatically different years. *Global Biogeochemical Cycles* **17**: n/a-n/a.
- Oberbauer, S. F., Tweedie, C. E., Welker, J. M., Fahnestock, J. T., Henry, G. H. R., Webber, P. J., Hollister, R. D., Walker, M. D., Kuchy, A., Elmore, E. & Starr, G. 2007. Tundra CO<sub>2</sub> fluxes in response to experimental warming across latitudinal and moisture gradients. *Ecological Monographs* **77**: 221-238.
- Ogle, D. H. 2017. FSA: Fisheries stock analysis. R-paketti.
- Peterson, B. G. & Carl, P. 2014. PerformanceAnalytics: Econometric tools for performance and risk analysis. R-paketti.
- Pihlatie, M. K., Christiansen, J. R., Aaltonen, H., Korhonen, J. F. J., Nordbo, A., Rasilo, T., Benanti, G., Giebels, M., Helmy, M., Sheehy, J., Jones, S., Juszczak, R., Klefoth, R., Lobo-do-Vale, R., Rosa, A. P., Schreiber, P., Serca, D., Vicca, S., Wolf, B. & Pumpanen, J. 2013. Comparison of static chambers to measure CH<sub>4</sub> emissions from soils. *Agricultural and Forest Meteorology* **171**: 124-136.
- Pimentel, C., Vasconcelos, R., Santos, M., Oliveira, R. & Machado, E. 2004. Effects of changes in the photosynthetic photon flux density on net gas exchange of Citrus limon and Nicotiana tabacum. *Brazilian Journal of Plant Physiology* **16**:
- Plaxton, W. C. & Podest  , F. E. 2006. The Functional Organization and Control of Plant Respiration. *Critical Reviews in Plant Sciences* **25**: 159-198.
- Pumpanen, J., Longdox, B. & Kutsch, W. 2010. Field measurement of soil respiration: Principles and constraints, potentials and limitations of different methods. Kirjassa: *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology* (Toim. Kutsch, W., Bahn, M. et al.), ss. 16-33. Cambridge University Press, Cambridge.

- Pumpanen, J., Heinonsalo, J., Rasilo, T., Villemot, J. & Ilvesniemi, H. 2012. The effects of soil and air temperature on CO<sub>2</sub> exchange and net biomass accumulation in Norway spruce, Scots pine and silver birch seedlings. *Tree Physiology* **32**: 724-736.
- Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., Kulmala, L., Siivola, E., Laakso, H., Kolari, P., Helenelund, C., Laakso, M., Uusimaa, M. & Hari, P. 2008. Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile. *Soil Science Society of America Journal* **72**: 1187-1196.
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J. C., Grünzweig, J. M., Reth, S., Subke, J., Savage, K., Kutsch, W., Østreng, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A. & Hari, P. 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**: 159-176.
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raghavendra, A. S. 2000. Photosynthesis : A comprehensive treatise. Cambridge U.P, Cambridge.
- Riihimäki, H., Heiskanen, J. & Luoto, M. 2017. The effect of topography on arctic-alpine aboveground biomass and NDVI patterns. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **56**: 44-53.
- Rinne, J. 2016. Suullinen tiedonanto. Keskustelu Kumpulassa.
- Rouse Jr., J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication* **351**: 309.
- Science Buddies Staff. 2017. *The Joly Photometer: Measuring Light Intensity Using the Inverse Square Law*.
- Shaver, G., Ratetter, e., Salmon, V., Street, L., van de Weg, M., Rocha, A., van Wijk, M. v. & Williams, M. 2013. Pan-Arctic modelling of net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub>. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences* **368**:
- Shaver, G. R., Street, L. E., Rastetter, E. B., Van Wijk, M. T. & Williams, M. 2007. Functional convergence in regulation of net CO<sub>2</sub> flux in heterogeneous tundra landscapes in Alaska and Sweden. *Journal of Ecology* **95**: 802-817.
- Shaver, G. R., Billings, W. D., Chapin, F. S., Giblin, A. E., Nadelhoffer, K. J., Oechel, W. C. & Rastetter, E. B. 1992. Global Change and the Carbon Balance of Arctic Ecosystems. *Bioscience* **42**: 433-441.

- Soetaert, K. & Herman, P. M. J. 2009. A practical guide<sup>[1]</sup> to ecological modelling – Using R as a simulation platform. Springer Science+Business Media, Dordrecht.
- Street, L. E., Shaver, G. R., Williams, M. & Van Wijk, M. T. 2007. What is the relationship between changes in canopy leaf area and changes in photosynthetic CO<sub>2</sub> flux in arctic ecosystems? *Journal of Ecology* **95**: 139-150.
- Susiluoto, S., Rasilo, T., Pumpanen, J. & Berninger, F. 2008. Effects of Grazing on the Vegetation Structure and Carbon Dioxide Exchange of a Fennoscandian Fell Ecosystem. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **40**: 422-431.
- Tagesson, T. 2006. Calibration and analysis of soil carbon efflux estimates with closed chambers at Forsmark and Laxemar. **R-06-125**:
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2010. Plant physiology. 5. painos. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Tsp Norway. 2015. The NORPERM permafrost database.
- Tsubo, M. & Walker, S. 2005. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. *Theoretical and Applied Climatology* **80**: 17-25.
- Tue-Ngeun, O., Sandford, R. C., Jakmunee, J., Grudpan, K., McKelvie, I. D. & Worsfold, P. J. 2005. Determination of dissolved inorganic carbon (DIC) and dissolved organic carbon (DOC) in freshwaters by sequential injection spectrophotometry with on-line UV photo-oxidation. *Analytica Chimica Acta* **554**: 17-24.
- USGS. 2015. ESPA Ordering Interface.
- Vaisala. 2013. Vaisala CARBOCAP® Carbon Dioxide Probe GMP343.
- Vaisala. 2012. How to Measure Carbon Dioxide – Vaisala application note.
- Wang, X., Liu, L., Piao, S., Janssens, I. A., Tang, J., Liu, W., Chi, Y., Wang, J. & Xu, S. 2014. Soil respiration under climate warming: differential response of heterotrophic and autotrophic respiration. *Global Change Biology* **20**: 3229-3237.
- Webb, E. E., Schuur, E. A. G., Natali, S. M., Oken, K. L., Bracho, R., Krapek, J. P., Risk, D. & Nickerson, N. R. 2016. Increased wintertime CO<sub>2</sub> loss as a result of sustained tundra warming. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **121**: 249-265.
- Whiting, G. J. 1994. CO<sub>2</sub> exchange in the Hudson Bay lowlands: Community characteristics and multispectral reflectance properties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) **99**: 1519-1528.

- Wood, S. N. 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* **73**: 3-36.
- Xie, Y., Sha, Z. & Yu, M. 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology* **1**: 9-23.
- Zhou, Y., Hagedorn, F., Zhou, C., Jiang, X., Wang, X. & Li, M. 2016. Experimental warming of a mountain tundra increases soil CO<sub>2</sub> effluxes and enhances CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O uptake at Changbai Mountain, China. - *Scientific Reports* - 21108.

## Liitteet

### Liite 1. Hehkutushäviöanalyysien tulokset

Punnitusten yhteydessä valittujen näytteiden hehkutushäviöanalyysissä todetut hehkutusjäännökset. Analyysi tehtiin ainoastaan sellaisille näytteille, joiden punnitusten yhteydessä todettiin mahdollisesti sisältävän mineraaliaineita. Isomman jäännösprosentin näytteissä on ollut enemmän mineraaliainesta mukana. Punnitustulokset korjattiin aineistoon tulosten mukaisesti.

| näyte        | jäännös % |
|--------------|-----------|
| 83A karike   | 7,5       |
| 89B karike   | 3,3       |
| 35A karike   | 18,2      |
| 65A biomassa | 17,9      |
| 97A karike   | 8,3       |
| 93B karike   | 5,5       |
| 58B karike   | 22,8      |
| 78B crypto   | 18,0      |
| 62A karike   | 10,5      |
| 97B karike   | 19,1      |
| 57B karike   | 20,6      |
| 66B karike   | 16,4      |
| 66A karike   | 11,6      |
| 50B karike   | 15,2      |



## Liite 2. Kenttälomake

|   |  |  |                   |        |  |
|---|--|--|-------------------|--------|--|
| Saitti nro:                                   |  |  | Mittaja:          |        |  |
| Päivämäärä:                                   |  |  |                   |        |  |
| Kaulus A                                      |  |  | Kauluksen syvyys: |        |  |
| Huomioita                                     |  |  |                   |        |  |
| Ilmanpaine                                    |  |  |                   |        |  |
| Maap. kosteus                                 |  |  |                   |        |  |
| Maap. lämpötila                               |  |  |                   |        |  |
| Biomassanäyte otettu <input type="checkbox"/> | Humusnäyte otettu <input type="checkbox"/> | Maaperänäyte otettu <input type="checkbox"/> |                   |        |  |
|   | Mittausten aloitusajat                     | PAR:   | Laite             | Huomio |  |
| Valo mittaus 1 alkuaika                       |  |  |                   |        |  |
| Valo mittaus 2 alkuaika                       |  |  |                   |        |  |
| Valo mittaus 3 alkuaika                       |  |  |                   |        |  |
| Himm mittaus 1 alku                           |  |  |                   |        |  |
| Himm mittaus 2 alku                           |  |  |                   |        |  |
| Himm mittaus 3 alku                           |  |  |                   |        |  |
| Pimeä mittaus 1 alku                          |  |  |                   |        |  |
| Pimeä mittaus 2 alku                          |  |  |                   |        |  |
| Pimeä mittaus 3 alku                          |  |  |                   |        |  |
| Maahengitys 1 alku                            |  |  |                   |        |  |
| Maahengitys 2 alku                            |  |  |                   |        |  |
| Maahengitys 3 alku                            |  |  |                   |        |  |

|   |  |  |                   |        |  |
|---|--|--|-------------------|--------|--|
| Kaulus B                                      |  |  | Kauluksen syvyys: |        |  |
| Ilmanpaine                                    |  |  |                   |        |  |
| Maap. kosteus                                 |  |  |                   |        |  |
| Maap. lämpötila                               |  |  |                   |        |  |
| Biomassanäyte otettu <input type="checkbox"/> | Humusnäyte otettu <input type="checkbox"/> | Maaperänäyte otettu <input type="checkbox"/> |                   |        |  |
|   | Mittausten aloitusajat                     | PAR:   | Laite             | Huomio |  |
| Valo mittaus 1 alkuaika                       |  |  |                   |        |  |
| Valo mittaus 2 alkuaika                       |  |  |                   |        |  |
| Valo mittaus 3 alkuaika                       |  |  |                   |        |  |
| Himm mittaus 1 alku                           |  |  |                   |        |  |
| Himm mittaus 2 alku                           |  |  |                   |        |  |
| Himm mittaus 3 alku                           |  |  |                   |        |  |
| Pimeä mittaus 1 alku                          |  |  |                   |        |  |
| Pimeä mittaus 2 alku                          |  |  |                   |        |  |
| Pimeä mittaus 3 alku                          |  |  |                   |        |  |
| Maahengitys 1 alku                            |  |  |                   |        |  |
| Maahengitys 2 alku                            |  |  |                   |        |  |
| Maahengitys 3 alku                            |  |  |                   |        |  |

Liite 3. Kauluksittaisten keskiarvojen laskemiseen käytetyt painotuskertoimet

| kaulus painotus |     | kaulus painotus |     | kaulus painotus |     |
|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|
| s18_a_          | 0,8 | s57_a_          | 0,5 | s70_b_          | 0,6 |
| s18_b_          | 0,2 | s57_b_          | 0,5 | s78_a_          | 0,7 |
| s19_a_          | 0,6 | s58_a_          | 0,5 | s78_b_          | 0,3 |
| s19_b_          | 0,4 | s58_b_          | 0,5 | s81_a_          | 0,5 |
| s33_a_          | 0,6 | s61_a_          | 0,6 | s81_b_          | 0,5 |
| s33_b_          | 0,4 | s61_b_          | 0,4 | s82_a_          | 0,5 |
| s35_a_          | 0,4 | s62_a_          | 0,3 | s82_b_          | 0,5 |
| s36_a_          | 0,7 | s62_b_          | 0,7 | s89_a_          | 0,6 |
| s36_b_          | 0,3 | s63_a_          | 0,4 | s89_b_          | 0,4 |
| s41_a_          | 0,4 | s63_b_          | 0,6 | s91_a_          | 0,5 |
| s41_b_          | 0,6 | s64_a_          | 0,3 | s91_b_          | 0,5 |
| s42_a_          | 0,4 | s64_b_          | 0,7 | s92_a_          | 0,8 |
| s42_b_          | 0,6 | s65_a_          | 0,4 | s92_b_          | 0,2 |
| s50_b_          | 0,6 | s65_b_          | 0,6 | s97_a_          | 0,8 |
| s51_a_          | 0,5 | s66_a_          | 0,6 | s97_b_          | 0,2 |
| s53_a_          | 0,4 | s66_b_          | 0,4 | s98_a_          | 0,3 |
| s53_b_          | 0,6 | s67_a_          | 0,4 | s98_b_          | 0,7 |
| s55_a_          | 0,3 | s67_b_          | 0,6 | s99_a_          | 0,8 |
| s55_b_          | 0,7 | s70_a_          | 0,4 | s99_b_          | 0,2 |

Liite 4. Kenttäjaksot ja kenttätöntekijät.

|                       |  |
|-----------------------|--|
| 12.7.2015 - 18.7.2015 | Markus Jylhä, Anna Virkkala, Janne Rinne |
| 22.7.2015 - 26.7.2015 | Markus Jylhä, Anna Virkkala              |
| 30.7.2015 - 2.8.2015  | Anna Virkkala, Elina Puhjo               |

## Liite 5. Mallit

### GAM-malli, rs-aineisto, GPP600 ja NDVI:

```
> phgam5=gam((sqrt(GPP600))~s(NDVI, k=3), data=kvarialles)
> summary(phgam5)
```

Family: gaussian  
Link function: identity

Formula:  
(sqrt(GPP600)) ~ s(NDVI, k = 3)

Parametric coefficients:

|             | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|----------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 15.6740  | 0.7081     | 22.13   | <2e-16 *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

|         | edf   | Ref.df | F    | p-value      |
|---------|-------|--------|------|--------------|
| s(NDVI) | 1.734 | 1.929  | 36.4 | 1.51e-08 *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq. (adj) = 0.713    Deviance explained = 73.2%  
GCV = 15.065    Scale est. = 13.54    n = 27

### GAM-malli, rs-aineisto, respiraatio, NDVI ja lumen sulamispäivä:

```
> ERgam1=gam(sqrt(ER)~s(NDVI, k=3)+s(snow, k=3), data=kvarialles)
> summary(ERgam1)
```

Family: gaussian  
Link function: identity

Formula:  
sqrt(ER) ~ s(NDVI, k = 3) + s(snow, k = 3)

Parametric coefficients:

|             | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|----------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 17.1401  | 0.7795     | 21.99   | <2e-16 *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

|         | edf   | Ref.df | F      | p-value      |
|---------|-------|--------|--------|--------------|
| s(NDVI) | 1.314 | 1.526  | 33.360 | 5.76e-07 *** |
| s(snow) | 1.842 | 1.971  | 3.652  | 0.049 *      |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq. (adj) = 0.763    Deviance explained = 79.2%  
GCV = 19.39    Scale est. = 16.406    n = 27

GAM-malli, in situ -aineisto, GPP600, keskilämpötila ja putkilokasvien biomassa:

```
> phgam1m=gam((sqrt(GPP600))~s(meantemp, k=3)+s(vasc, k=3), data=mvari ables)
> summary(phgam1m)
```

Family: gaussian  
Link function: identity

Formula:  
(sqrt(GPP600)) ~ s(meantemp, k = 3) + s(vasc, k = 3)

Parametric coefficients:

|             | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|----------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 15.711   | 0.648      | 24.25   | <2e-16 *** |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

|             | edf   | Ref. df | F      | p-value      |
|-------------|-------|---------|--------|--------------|
| s(meantemp) | 1.952 | 1.998   | 26.582 | 5.84e-09 *** |
| s(vasc)     | 1.000 | 1.000   | 5.633  | 0.0212 *     |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq. (adj) = 0.578    Deviance explained = 60%  
GCV = 25.716    Scale est. = 23.933    n = 57

GAM-malli, in situ -aineisto, respiraatio, keskilämpötila ja maaperän kosteus:

```
> ERgam4m=gam(sqrt(ER)~s(meantemp, k=3)+s(soilmoist, k=3), data=mvari ables)
> summary(ERgam4m)
```

Family: gaussian  
Link function: identity

Formula:  
sqrt(ER) ~ s(meantemp, k = 3) + s(soilmoist, k = 3)

Parametric coefficients:

|             | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|----------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 17.3828  | 0.6206     | 28.01   | <2e-16 *** |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

|              | edf  | Ref. df | F      | p-value      |
|--------------|------|---------|--------|--------------|
| s(meantemp)  | 1.97 | 1.999   | 48.533 | 4.39e-15 *** |
| s(soilmoist) | 1.00 | 1.000   | 4.305  | 0.0428 *     |

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq. (adj) = 0.701    Deviance explained = 71.7%  
GCV = 23.596    Scale est. = 21.953    n = 57